INVESTIGACION y CIENCIA

ONDAS DE CHOQUE EN EL VACIO DEL ESPACIO

¿VACUNAS CONTRA EL VIRUS DE LA HEPATITIS B?

CELULAS SOLARES ESPAÑOLAS

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



DINOSAURIOS A LA CARRERA

JUNIO 1991
600 PTAS.



Junio de 1991 Número 177

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Gerardo Pastor: *Estructura de los cuasicristales*; Luis Cornudella: *Cremalleras moleculares y regulación génica*; Manuel Puigcerver: *Ondas de choque en el vacío del espacio*; Santiago Torres: *Virus de la hepatitis B*; Luis Bou: *Vidrios fotocrómicos y fotosensibles* y *Juegos matemáticos*; Joandomènec Ros: *Dinosaurios a la carrera*; Juan José Acero: *Palabras difíciles*; J. Vilardell: *Hace...*

Ciencia y sociedad:

Joandomènec Ros, Fernando Azorín, Josep E. Llebot y J. M. García de la Mora

Ciencia y empresa:

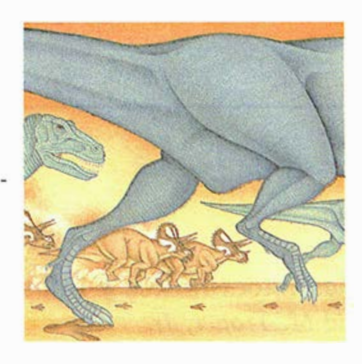
Manuel Puigcerver

Libros:

Mikel de Epalza, Javier de Lorenzo, Francisco J. Sánchez, Jorge Agustí y Luis Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
5	Antonio Luque
6-12	Silvia Nuere y Antonio Luque
14	Kenji Hiraga, U. Tohoku
15	An Pang Tsai, Akihisa Inoue y Tsuyoshi Masumoto, Universidad de Tohoku
16-22	Laurie Grace
25	Steven Lanier McKnight
26	George V. Kelvin
27	S. L. McKnight (*izq.*), George V. Kelvin (*dcha.*)
28	George V. Kelvin (*arriba y abajo*), abajo cortesía de Ted Abel y Tom Maniatis, Universidad de Harvard
29	George V. Kelvin (*arriba*), Jason Küffer (*abajo*)
30	George V. Kelvin
47	George Retseck, cortesía de Bruce Tsurutani, Lab. Propulsión a Chorro y Paul Rodriguez, Lab. Investigación Naval
48-49	George Retseck
50	Stewart Moses, TRW
51	D. Papadopoulos y Peter Cargill, Universidad de Maryland
54	George Retseck (*arriba*), Charles F. Kennel (*abajo*)
55	George Retseck (*izquierda*), Observatorios de Monte Wilson y Palomar (*derecha*)
58	Pierre Tiollais
59	Tomo Narashima
60	Jason Küffer
61-64	Tomo Narashima
66-67	Corning, Inc.
68	Michael Goodman
69	Michael Goodman (*arriba, a la izquierda*), Corning, Inc. (*arriba, a la derecha*), Frank J. Borkowski, Foto Forum (*abajo*)
70	Corning, Inc. (*arriba, izq.*), Peter Aldridge y Robin Revell, Corning, Inc. (*arriba, dcha.*), Edward Keating (*abajo*)
71	Corning, Inc.
74-76	Patricia J. Wynne
77	Museo Americano de Historia Natural
78-80	Patricia J. Wynne
82-83	Ian Worpole
84-85	Laurie Grace
86-87	Tom Maday (*izquierda*), Moshe Milner/Sygma (*centro*), Tom Zimberoff (*derecha*)
89	Jason Küffer
91	Hank Iken
95-96	Thomas C. Moore



LA ILUSTRACION de la portada corresponde al dinosaurio carnívoro *Tyrannosaurus* y, al fondo, al herbívoro *Triceratops*. Se ignora la celeridad con que se movían estos reptiles del Mesozoico. Ahora bien, cálculos precisos, basados en los principios de la física y de la ingeniería naval, podrían aportarnos la respuesta (véase "Dinosaurios a la carrera", por R. McNeill Alexander, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	6600	12.000
Extranjero	7300	13.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 600 pesetas
Extraordinario: 775 pesetas

— Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 652 42 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45 - Fax 409 70 46

Cataluña: Marcel Klein
M. K. Publicidad
Ortigosa, 14-16, 3º, D. 20
08003 Barcelona Tel. 268 45 05 - Fax 268 16 07

ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Tecfa. Línea Fotomecánica, Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: "De la magra producción de aviones ligeros —sólo 6000 unidades en todo 1940— alguien podría inferir que no existe, por parte del público, el mismo interés hacia estos vehículos que el que le impulsa a adquirir millones de automóviles. Pero las causas son otras, y añejas: los aviones actuales siguen siendo difíciles de pilotar, encierran mayor peligro que los automóviles y hay pocos campos de aterrizaje de tamaño suficiente. Tanto Ford como United se proponen hacer frente a esas limitaciones experimentando con aviones que puedan operarse desde campos pequeños; el jardín de casa, por ejemplo, si es que alguien quiere aventurarse tanto en el pronóstico. Esto supone que el avión definitivo estará concebido de modo que sea controlable a velocidad nula o casi nula, posibilidad que hoy día ya ofrecen ciertos helicópteros, tal como ha demostrado sobradamente Igor Sikorsky."

"El achatamiento de la Tierra por los extremos de su eje de rotación se debe a la fuerza centrífuga originada por su propia rotación. Hay varios procedimientos que permiten determinar la forma de nuestro planeta. Así, podemos medir qué longitud abarca sobre la superficie terrestre un grado de latitud; podemos cuantificar la gravedad, que es menor en el ecuador que en los polos, mediante el período de oscilación de un péndulo. Además, la atracción de la Luna sobre el abultamiento ecuatorial de la Tierra influye en la rotación de ésta y causa la precesión de los equinoccios. El ritmo anual de este lento desplazamiento del eje terrestre se conoce con gran precisión y puede calcularse en términos de elipticidad. Reuniendo los datos de los movimientos de la Luna y los de la gravedad terrestre, el doctor Jeffreys calcula que la elipticidad es 1/297,05 ± 0,38; es decir, que el diámetro polar es más corto que el ecuatorial en esa fracción del segundo."

"Los doctores Frederick H. Falls, V. C. Freda y H. H. Cohen, de la facultad de medicina de la Universidad de Illinois, han dado a conocer una prueba dermorreactiva capaz de predecir en menos de una hora si una mujer va a ser madre. Esta prueba es parecida a la que se hace para detectar la alergia a la fiebre del heno, y se afirma que su fiabilidad es del 98 por ciento. Consiste en inyectar con aguja hipodérmica en la piel del antebrazo una dosis de calostro, que es un líquido acuoso que los pechos segregan durante el embarazo, antes de iniciarse la formación de leche. Si la mujer examinada está embarazada, no se produce reacción. Pero si no lo está, aparece, antes de una hora, una zona rojiza de tres a cinco centímetros de diámetro en torno al punto inyectado."

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: "En la reunión anual del Consejo de Sanidad del Estado de Michigan, el doctor Baker informó haber descubierto la causa de la gripe, cuya frecuencia se ha visto notablemente incrementada durante el último trimestre. Según afirma, los gérmenes de la enfermedad están por lo general siempre presentes, pero deben existir determinadas condiciones meteorológicas que, si coinciden, irritan la garganta y los conductos respiratorios lo suficiente para facilitar la entrada de los gérmenes en el organismo. En este caso, tales condiciones meteorológicas fueron el excesivo predominio de los vientos del norte y noreste, y el incremento de ozono a lo largo de los últimos tres meses. Conocidas las causas, podrá comenzar el estudio de las medidas preventivas."

"En el pasado, el señor Hiram Maxim dedicó cierto tiempo a extensos estudios relativos a la navegación aérea. Sus ensayos parecen haber cristalizado en forma de una máquina que podríamos llamar cometa a vapor. Este ingenio experimental consiste en una cometa o plancha, de aproximadamente 1,20 m de ancho por cuatro de largo, propulsada por una hélice capaz de girar a 2500 revoluciones por minuto. Cuando recibe la inclinación adecuada y la hélice lo impulsa a la velocidad de 30 millas por hora, el aparato se mantiene solo en el aire; si la velocidad de avance crece hasta 35 millas por hora, comienza a ascender; a 90 millas por hora, su fuerza ascensional es muy poderosa. Actualmente, el señor Maxim está dedicado a una gran máquina de seda y acero, al que dará potencia un motor de queroseno."

"Pregunta el *Pall Mall Budget*: ¿por qué es tan difícil y caro construir un telescopio gigante? Alguien, ansioso de adelantarse a los acontecimientos, ha respondido: ¿por qué no sustituir el vidrio, que no es sino un medio que transmite la luz a una velocidad distinta que el aire, por un campo eléctrico convenientemente configurado? Cabe imaginar un campo eléctrico artificial de quince metros de diámetro. Desde luego, con nuestros conocimientos presentes nada podemos decir acerca de su naturaleza, pero algún día lo sabremos y, entonces, estaremos en posesión de los secretos de otros planetas."

Células solares muy eficientes

En el laboratorio se ha conseguido hasta un 35 por ciento de rendimiento en la conversión de energía solar en eléctrica, cifra que triplica la eficiencia media de las células solares comerciales y aumenta su rentabilidad

Antonio Luque

Aunque la atención pública sobre la energía solar no es hoy la que era tras la primera crisis de la energía, en 1973, la realidad es que en los últimos cinco años se han producido avances científicos que nos hacen contemplar con optimismo las posibilidades de llegar un día, no lejano, a obtener del sol una parte importante de la electricidad que consumimos.

La electricidad fotovoltaica de origen solar es inocua para el entorno. Las emisiones de CO_2 y demás gases nocivos oscilan entre el 1 % y el 30 % de las que despide una central moderna de carbón, teniendo en cuenta en todos los casos las operaciones de extracción, construcción y explotación. A diferencia de los otros métodos de generación, las células solares no necesitan agua para refrigeración, lo que reviste su interés en países secos como España. El desecho sólido, producido tan sólo al desmantelarlas una vez terminado su largo ciclo de vida (las células solares son virtualmente eternas), está constituido básicamente por chatarra de hierro y vidrio, y es menor que los residuos de baja radiactividad de una central nuclear que haya generado la misma electricidad.

ANTONIO LUQUE se doctoró, con premio extraordinario, en 1966 por la Universidad Politécnica de Madrid, con la construcción de un láser de rubí. Desde 1970 es catedrático de electrónica física en dicha universidad, en la que dirigió la creación de un laboratorio de semiconductores que en 1975 fabricó su primera pastilla ("chip") de circuito integrado. Desde 1979, dicho laboratorio pasó a constituirse en Instituto de Energía Solar, centro del que es director. Es inventor de la célula solar bifacial, que fabrica hoy ya una empresa española. En 1989 Luque recibió el premio nacional Torres Quevedo por el que el estado reconoce el mérito a la investigación tecnológica.

Ya hoy la electricidad fotovoltaica es rentable en muchas aplicaciones en las que se requiere un consumo reducido en un lugar remoto; casos típicos son los generadores eléctricos a bordo de los satélites artificiales y las instalaciones rurales en países en vías de desarrollo, aplicación esta última cuyo contenido social excede en mucho a su relevancia energética. Sin embargo, el reto sigue siendo abaratar esta energía, aun cuando se ha avanzado mucho ya en ese sentido: hoy es unas siete veces más barata que hace veinte años, pero todavía hay que abaratarla entre dos y cuatro veces para que sea rentable en competencia con otras fuentes convencionales. (O quizá, tan sólo, esperar que éstas suban de precio.)

Desde la primera crisis de la energía ha habido una saludable competencia entre dos concepciones sobre cómo lograr este abaratamiento: los que abogaban por unas células solares "económicas", con capas delgadas de un semiconductor estructuralmente poco perfecto y bajo coste por metro cuadrado, y quienes insistían en la rentabilidad de las buenas células, aun cuando se usaran lentes o espejos, más baratos, para recoger la energía luminosa.

En los últimos cinco años se han experimentado logros muy importantes en la consecución de altos rendimientos, algunos de ellos, como en el caso del silicio cristalino, por encima de las expectativas más optimistas. En este artículo nos vamos a ocupar exclusivamente de estas células de alto rendimiento.

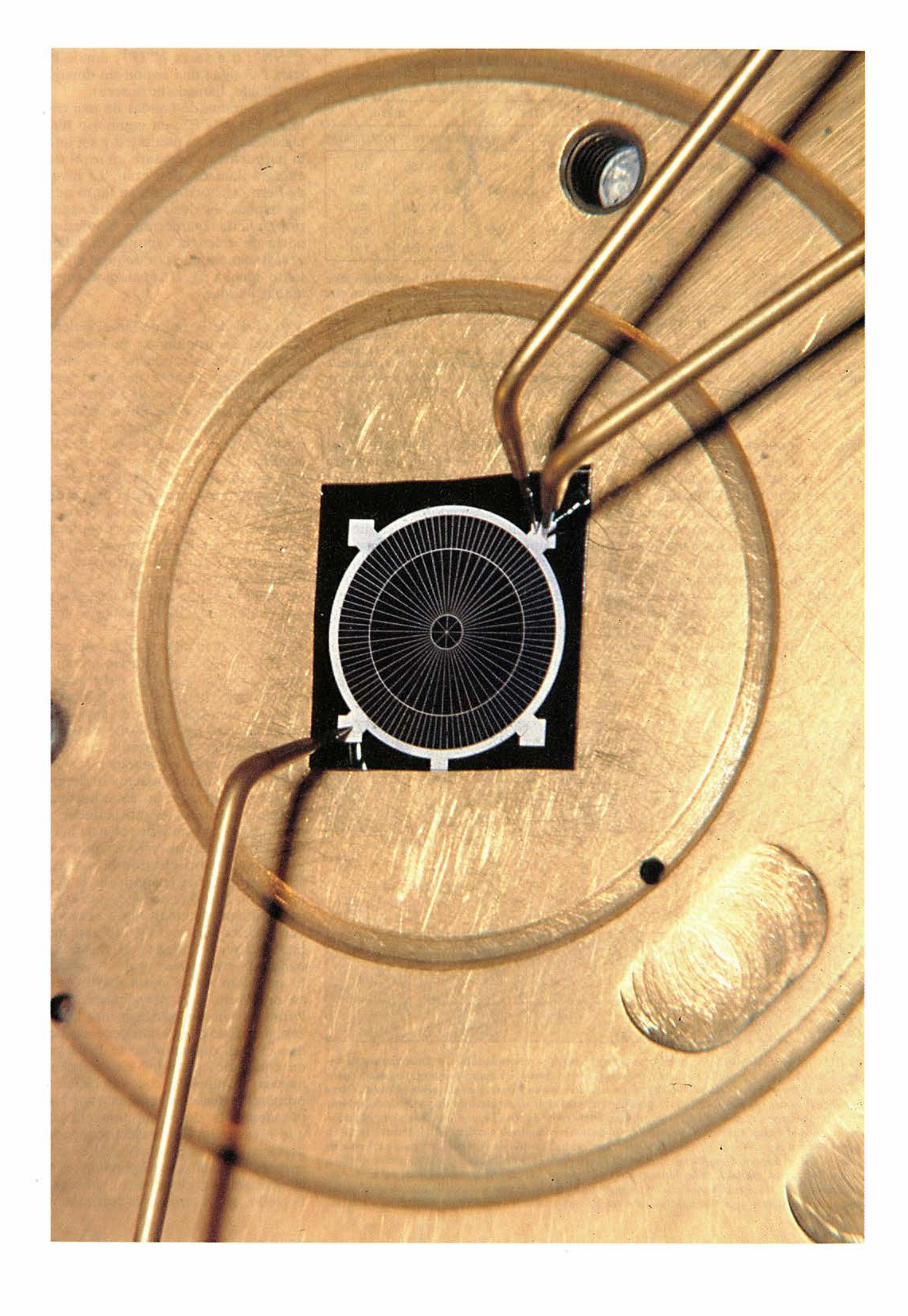
Las células solares se fabrican con material semiconductor, frecuentemente silicio. Para estudiar los semiconductores es corriente hacer uso de un diagrama de bandas. Se compone de tres: la de valencia, la prohibida y la banda de conducción. El rango de energías de la banda de valencia corresponde a las que tienen los electrones de valencia, es decir, los ligados a los átomos. Estos electrones no poseen una energía fija, como en los átomos aislados, sino que presentan energía en todo el rango de dicha banda. Como, en principio, no le falta al semiconductor ningún electrón de valencia, se dice que esta banda está llena, en el sentido de que no podemos introducir en ella ningún electrón adicional.

La banda de conducción está, en principio, vacía de electrones. Pero si se arranca de su enlace un electrón de valencia, adquiere entonces una energía que lo sitúa dentro de esa banda.

Entre la banda de valencia, que ocupa en el diagrama la parte inferior, y la de conducción, que se extiende en el tramo superior, hallamos la banda prohibida. En ésta no se puede encontrar jamás (salvo excepciones que no vienen ahora al caso) ningún electrón, y cuya anchura, *Eg*, es una característica del semiconductor en cuestión.

Por distintas causas puede haber electrones en la banda de conducción. La más frecuente es que hayamos añadido cierta cantidad de impurezas llamadas donadoras, variable, entre 10^{12} y 5×10^{20} átomos por centímetro cúbico en un cristal semiconductor que tiene unos 5×10^{22} átomos por centímetro cúbico. Estas impurezas, o dopado del material, introducen alguno de sus electrones en la banda de conducción. Aquí, los electrones pueden moverse con entera libertad; en determinadas circunstancias su movimiento produce una corriente eléctrica. Los semiconductores con abundantes átomos donadores, por ello

1. CELULA SOLAR de silicio fabricada en la Universidad Politécnica de Madrid para ser integrada en el "ojo fotovoltaico". La célula se está midiendo en un simulador solar. Con estas células se ha alcanzado un redimiento del 20 por ciento.



RENDIMIENTOS BAJO LUZ CONCENTRADA: OBJETIVOS Y LOGROS						
	OBJETIVOS		LOGROS			
CELULA	1976		1986		1990	
	Rendimiento	Concentración	Rendimiento	Concentración	Rendimiento	Concentración
SILICIO	18-20 %	50-200	28 % (St)	100	28 % (St)	100
ARSENIURO GALIO	24-26 %	500-2000	26 % (Va)	753	29 % (Va) 28 % (Va)	203 403
DOS MATERIALES	30-35 %	500-2000	26 % (Va)	100	31 % (Sa) 35 % (Bo)	500 150

2. RENDIMIENTOS BAJO LUZ CONCENTRADA: objetivos y logros. En 1976 la administración de los Estados Unidos estableció unos objetivos de rendimientos y concentraciones a alcanzar en diez años. Muchos fueron ampliamente sobrepasados; algunos se han alcanzado más tarde. Las iniciales entre paréntesis indican los grupos que consiguieron los resultados indicados: (St) Universidad de Stanford; (Va) Centro de Investigación de Varian, Palo Alto; (Bo) Centro de Alta Tecnología de Boeing, Seattle; (Sa) Laboratorios Nacionales Sandia, Albuquerque. La concentración a la que corresponde el rendimiento aparece en número de soles estándar, correspondiendo un sol estándar a una potencia luminosa de 0,1 watts por centímetro cuadrado. El resultado de Sandia se obtuvo con células de silicio y arseniuro de galio combinadas; el de Boeing, con AsGa y SbGa.

buenos conductores de la electricidad, se llaman de tipo *N*. (Los electrones portan carga negativa.)

Otras impurezas, llamadas aceptadores (o aceptoras), capturan un electrón de la banda de valencia y dejan en ella un hueco vacío de electrón: estos huecos se comportan como partículas dotadas de carga positiva que, en valor absoluto, es igual a la del electrón. Los huecos de la banda de valencia son también móviles, como los electrones de la banda de conducción. Los semiconductores que conduce por huecos se llaman de tipo *P*.

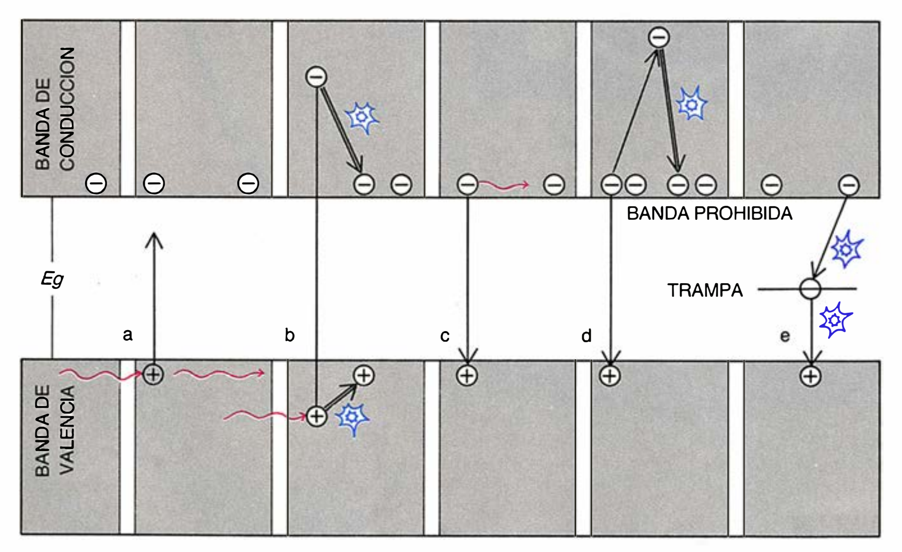
La mayoría de los dispositivos semiconductores, la célula solar entre ellos, están constituidos por monocristales semiconductores en los que se introducen donadores y aceptadores de manera desigual. La estructura fundamental de una célula consta de base y emisores. Consiste la primera en una región central más o menos ancha, poco dopada, que se sitúa entre dos emisores, que son regiones superficiales, muy dopadas y con donadores y aceptadores, respectivamente. Decimos que es una estructura N^+PP^+ (puede también ser P^+NN^+, o a veces N^+IP^+, donde la letra *I* designa una región sin dopaje apreciable, llamada intrínseca).

El diagrama de bandas de una célula solar N^+PP^+, en equilibrio térmico (es decir en oscuridad y sin que le hurguemos), presenta un nivel de energía llamado de Fermi. El nivel de Fermi es horizontal, en tanto que las bandas, es decir, el límite superior de la de conducción y el inferior de la de valencia, adquieren relieves; sí se mantiene por doquier constante, igual a *Eg*, la separación entre ambas bandas.

El nivel de Fermi define el potencial electroquímico de los electrones en el semiconductor. Los electrones fluyen siempre del nivel más alto al más bajo, por cuya razón en un semiconductor en equilibrio el nivel de Fermi ha de ser horizontal. Desde otro punto de vista, este nivel cifra la cantidad de electrones y huecos que hay en cada lugar del semiconductor: si se encuentra cerca de la banda de conducción, o dentro de la misma, entonces el semiconductor tiene una alta densidad *n* de electrones (medida en electrones por centímetro cúbico), como ocurre en la región N^+; si está cerca de la banda de valencia, tiene una alta densidad *p* de huecos, como en la región P^+.

Para que el nivel de Fermi esté cerca de la banda de conducción, como ocurre en una región *N*, debe estar, eso es obvio, lejos de la de valencia; por eso, en estas regiones hay muy pocos huecos. En equilibrio térmico, el producto *np* es constante en todo el semiconductor, sea la región *N* o *P*.

Cuando el semiconductor se ilumina, los fotones de la luz solar pueden romper los enlaces, bombeando electrones desde la banda de valencia hasta la de conducción y generando así abundantes pares electrón-hueco. El fenómeno provoca la aparición de dos niveles de Fermi diferentes, que ahora se llaman pseudoniveles de Fermi, uno para los electrones y otro para los huecos, y en vecindad respectiva de la banda de conducción y de valencia. El producto *np* es ahora mayor que en equilibrio. Los pseudoniveles de Fermi ya no son estrictamente horizontales. Esto es una consecuencia de que el semiconductor no se halla ya en equilibrio, pues los electrones y huecos se mueven con velocidades proporcionales a las pendientes de los pseudoniveles de Fermi respectivos, que causan corrientes eléctricas proporcionales a las pendientes. Las corrientes son también proporcionales a la densidad de electrones o huecos. Por ello, si las corrientes son mode-



3. DIAGRAMAS DE BANDAS y procesos de generación y recombinación. Se muestran las de valencia, conducción y prohibida. Ciertos fotones (*línea ondulada*) no tienen la energía necesaria para producir la transición (*flecha*) de un electrón a la banda de conducción y no son absorbidos (*a*). Otros la tienen de sobra (*b*); son absorbidos y producen la transición; el par electrón hueco producido pierde parte de la energía (*flecha gruesa*) con producción de calor (*signo de explosión*). Los pares electrón-hueco pueden recombinarse con emisión de un fotón: recombinación radiativa (*c*). Pueden también recombinarse cediendo su energía a otro electrón (recombinación Auger) que la pierde en forma de calor (*d*). El proceso más probable es la recombinación a través de trampas (recombinación SRH), en la que la trampa excitada recombina su electrón con un hueco, con producción de calor. La re-excitación de la trampa es inmediata en un semiconductor *N*. Procesos simétricos de recombinación SRH y Auger tienen lugar en semiconductores *P*, cambiando los papeles de electrones y huecos.

radas las pendientes de los pseudoniveles son pequeñas en regiones con alta densidad de electrones o huecos.

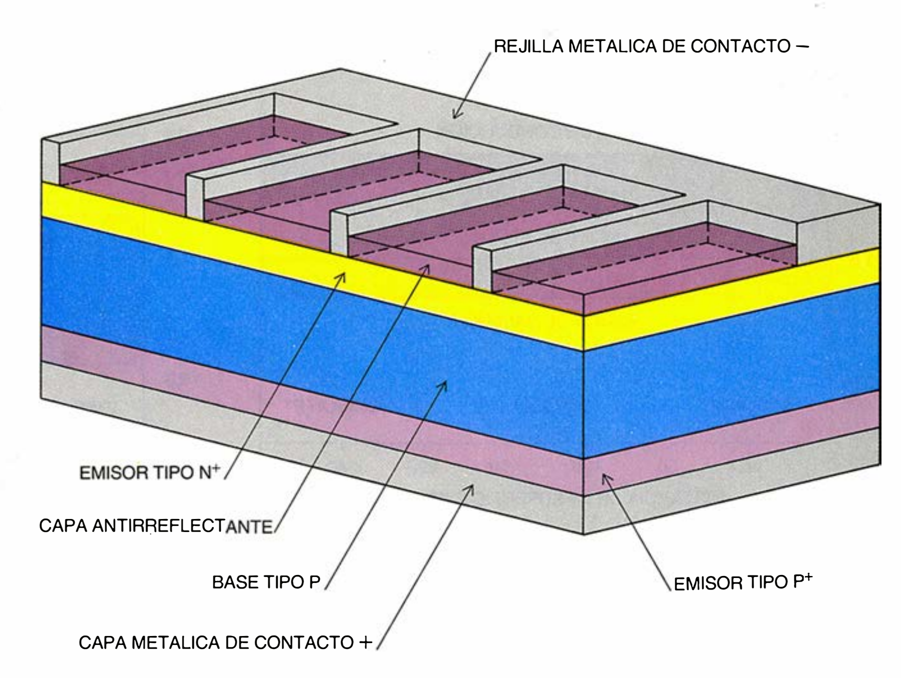
¿Cómo funciona una célula solar? Todos saben que se trata de un dispositivo que, bajo iluminación, suministra corriente. La luz produce en él numerosas generaciones de pares electrón-hueco. Muchos de estos pares se recombinan y los electrones caen de nuevo en la banda de valencia. Una sencilla cuenta de balance establece que la corriente eléctrica de huecos, entregada al circuito exterior, que iguala al flujo de electrones que retorna al semiconductor, es la diferencia entre generaciones y recombinaciones que se producen por segundo en todo el semiconductor. (En realidad hay que multiplicar esas diferencias por la carga del electrón, si se quiere tener la igualdad correctamente escrita.) Es evidente que reducir las recombinaciones es una regla adecuada para aumentar la calidad de la célula solar.

Mas, para tener una buena célula, se requiere que, además de suministrar corriente, lo haga bajo un determinado voltaje, necesario para producir potencia eléctrica (que es precisamente el producto de la corriente por el voltaje).

En una célula solar aparecen, lo hemos visto, relieves en las bandas de valencia y conducción. Estos relieves son, en realidad, diferencias de energía potencial entre distintos puntos de la misma. En la célula en equilibrio las diferencias de energía potencial se compensan con otras que aparecen entre el semiconductor y el metal de los electrodos, y que son invariables con la iluminación. En resumen, en una célula solar en equilibrio no aparece ningún voltaje entre sus electrodos exteriores. No hubiera podido ser de otro modo sin violar los principios de la termodinámica.

En la célula solar, el contacto con los electrodos metálicos se hace sobre emisores N^+ y P^+ fuertemente dopados. Cumplen esas regiones fuertemente dopadas una propiedad interesante: la diferencia de energías entre el límite de la banda y el pseudonivel de Fermi de portadores mayoritarios (banda de conducción y pseudonivel de electrones, en emisores N^+, banda de valencia y pseudonivel de huecos en emisores P^+) es fija e inalterable por la iluminación.

Al separarse los pseudoniveles por efecto de la iluminación, arrastran consigo modificaciones en la posición de las bandas, de cuantía igual a la separación entre pseudoniveles, lo que se traduce en una disminución de los relieves de las bandas que causan la aparición de un desequilibrio de los potenciales del sistema completo célula-metales y, en consecuencia, la creación de un voltaje exterior entre los electrodos de la célula solar.



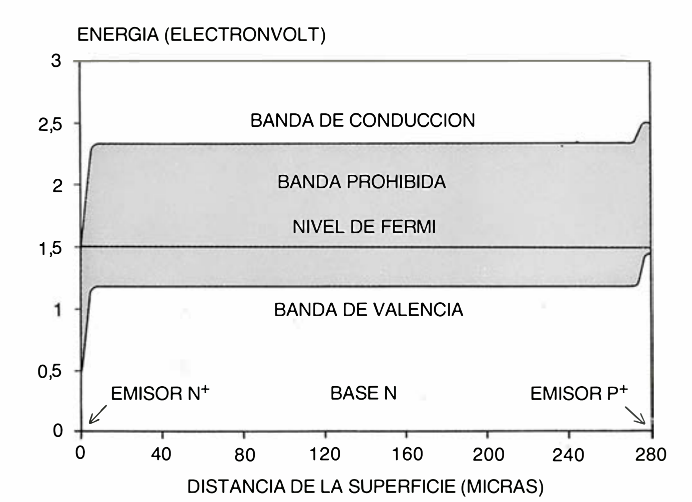
4. ESQUEMA DE UNA CELULA SOLAR MONOCRISTALINA, constituida por una placa de monocristal semiconductor, frecuentemente de silicio de tipo P en la base. En las dos caras de ésta se forman regiones fuertemente dopadas, P^+ y N^+, que llamamos emisores. En la cara frontal se añade además una capa antirreflectante de cuarto de onda. Se depositan también capas metálicas; la frontal posee forma de peine o rejilla para dejar pasar la luz. Las capas metálicas constituyen los electrodos.

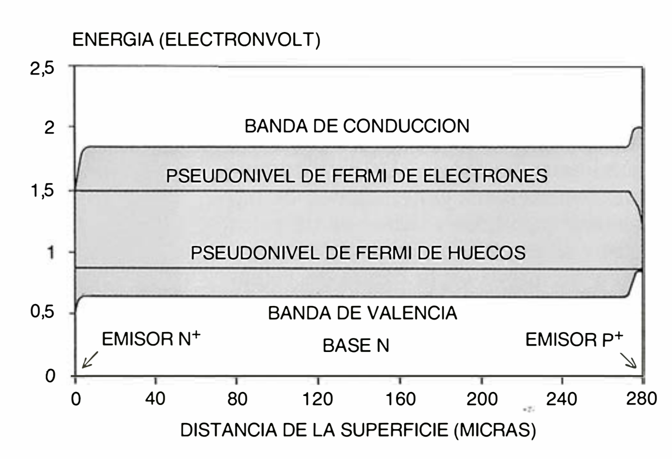
¿Qué es, pues, lo indispensable para construir una buena célula solar? Un semiconductor poco recombinante con una región que absorba los fotones, en cuya superficie se sitúen dos regiones P^+ y N^+, sobre las que se coloque los electrodos exteriores. No es imprescindible la región central P: la propia región P^+ puede formar la base. Tampoco es estrictamente necesario que las regiones P^+ y N^+ estén situadas en las caras opuestas de la célula.

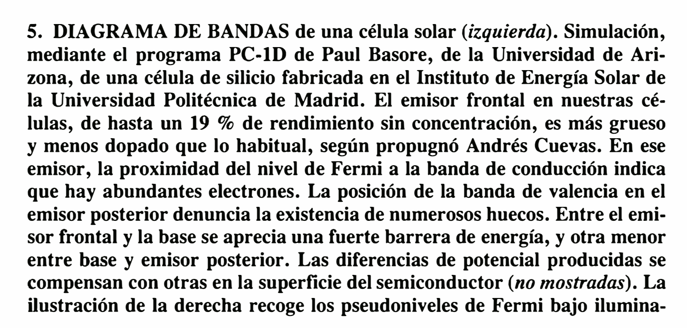
Cuanto más se separen los pseudoniveles de Fermi, tanto más voltaje aparecerá entre los electrodos de la célula, con el incremento consiguiente del producto *np*. Puesto que las recombinaciones requieren que choquen electrón con hueco, a mayor número de ambos más recombinaciones. De ello se deduce que la tasa de recombinaciones crece con el voltaje que aparece en la célula. Por tanto, en una célula solar a iluminación (y tasa de generaciones) constante, la corriente extraída decrece con el voltaje; a voltaje nulo, conseguido conectando un hilo metálico entre los dos electrodos de la célula (condición de cortocircuito), se producen menos recombinaciones por segundo que generaciones por segundo y la corriente casi iguala a estas últimas; en una célula de silicio iluminada por una potencia luminosa como la solar, de 0,1 watts por centímetro cuadrado, la corriente típica de cortocircuito que circula por el hilo es de 35-40 miliampères por cada centímetro cuadrado de célula.

Cuando se desconecta el hilo, impidiendo que fluya corriente al exterior de la célula (condición de circuito abierto), las generaciones deben igualar a las recombinaciones. Esto sólo se consigue con elevados valores del producto *np*, que implican una separación de los pseudoniveles de Fermi y, con ello, la aparición de un voltaje entre los electrodos (voltaje de circuito abierto). Voltaje que en una célula de silicio en las condiciones de iluminación antes mencionada viene a ser del orden de 600-640 milivolts. Existe una amplia variedad de casos intermedios, que resultan de la conexión de resistencias de diferentes valores en el circuito exterior, caracterizados por valores del voltaje y la corriente (cuyo cociente ha de ser la resistencia conectada), dando lugar así a la curva corriente-voltaje de utilización de la célula solar.

La potencia eléctrica extraída de las células solares es igual, recordemos, al producto de la corriente por el voltaje. Hay un valor máximo de esa potencia (correspondiente a una resistencia de carga óptima) que define a una situación intermedia en el



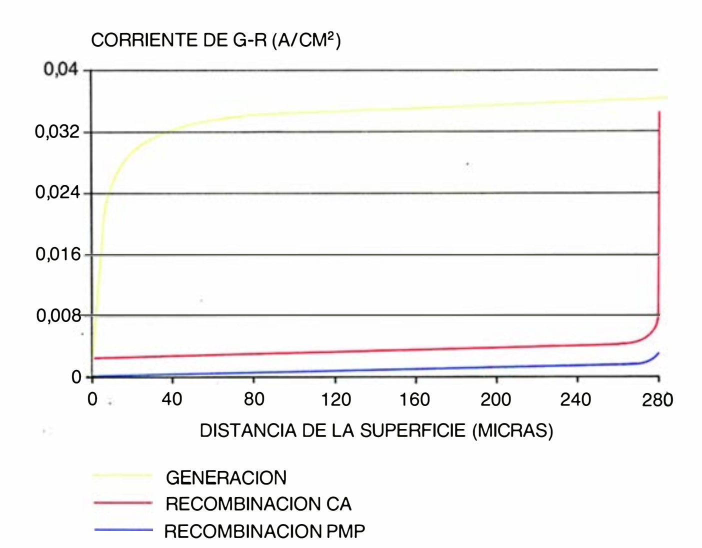


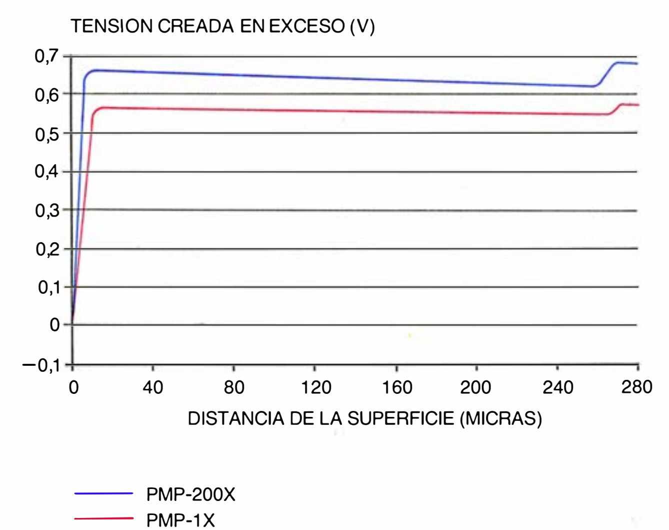


5. DIAGRAMA DE BANDAS de una célula solar (*izquierda*). Simulación, mediante el programa PC-1D de Paul Basore, de la Universidad de Arizona, de una célula de silicio fabricada en el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid. El emisor frontal en nuestras células, de hasta un 19 % de rendimiento sin concentración, es más grueso y menos dopado que lo habitual, según propugnó Andrés Cuevas. En ese emisor, la proximidad del nivel de Fermi a la banda de conducción indica que hay abundantes electrones. La posición de la banda de valencia en el emisor posterior denuncia la existencia de numerosos huecos. Entre el emisor frontal y la base se aprecia una fuerte barrera de energía, y otra menor entre base y emisor posterior. Las diferencias de potencial producidas se compensan con otras en la superficie del semiconductor (*no mostradas*). La ilustración de la derecha recoge los pseudoniveles de Fermi bajo iluminación. Se muestra el efecto de una iluminación de 0,1 watt por centímetro cuadrado (iluminación estándar) en una célula monocristalina. Los pseudoniveles de Fermi se separan por efecto de la iluminación; el de electrones queda fijado a la banda de conducción en el emisor N^+, fuertemente dopado; el de huecos lo hace a la banda de valencia en el emisor P^+. Como consecuencia, las barreras de potencial en las uniones de emisores con base se reducen y aparece un voltaje al exterior, de 0,55 volts, el cual es aproximadamente igual a la separación de los pseudoniveles de Fermi. En estas condiciones, la célula proporciona una corriente de 32,2 miliampères por cm^2 (punto de máxima potencia, PMP) al circuito exterior (al que se ha conectado una resistencia: 17,1 ohms si la célula es de 1 cm^2). Los pseudoniveles son casi horizontales; sólo el de electrones se inclina en la región P^+, para conferir mayor velocidad a los pocos electrones existentes en ella.

que las recombinaciones son del orden del 5 al 10 por ciento de las generaciones, reduciéndose la corriente en este valor y alcanzando voltajes de 50 a 100 milivolts menos de los que se producen en circuito abierto. El rendimiento de una célula solar se determina en este punto de máximo potencia (PMP); se define como el cociente de esta potencia eléctrica y la luminosa que incide sobre la célula.

Cuando aumenta la potencia luminosa lo hace el número de fotones y la tasa de generaciones. Crece, asimismo, la corriente de máxima potencia y el voltaje. En efecto, al haber más generaciones se producen más recombinaciones y, con ello, más separación de los pseudoniveles de Fermi; resulta así que el rendimiento aumenta con la potencia luminosa: de





6. LOCALIZACION de la generación y la recombinación en la célula solar (*izquierda*). Se muestran las generaciones y las recombinaciones totales, producidas desde la superficie, las últimas para dos condiciones del circuito de utilización: circuito abierto (CA), con corriente nula, y punto de máxima potencia (PMP) para la célula de la figura precedente. En el primer caso (CA) la generación y la recombinación deberían ser iguales al final de la célula, pero la recombinación que se produce en la interfaz con la rejilla frontal se ha considerado como corriente en un diodo externo, así que la diferencia que se aprecia en la figura es la recombinación en esa interfaz. La mayor recombinación se produce en la interfaz con la capa metálica posterior, seguida de las que se produce en el emisor posterior. En la situación de PMP, la diferencia entre generación y recombinación, 32,5 miliampères por cm^2, es la corriente inyectada al circuito exterior. La ilustración de la derecha representa la formación del voltaje que aparece al exterior. Si se superponen los diagramas de bandas en equilibrio y bajo iluminación, haciéndolos coincidir en la superficie frontal, la separación de ambos (por ejemplo del fondo de la banda de conducción) es la que da lugar a un voltaje. El valor total del voltaje es el existente en la superficie posterior. Se aprecia que la mayor formación de este voltaje se produce en la unión N^+P del emisor frontal; alguno se forma también en la unión PP^+ del emisor posterior, más apreciable en concentración. Hay una caída de tensión a lo largo de la base, debida a la resistencia de la misma, que a muy elevada concentración puede reducir mucho el voltaje exterior. El aumento de voltaje redunda en un aumento de rendimiento.

aquí el interés en trabajar con luz concentrada.

¿Cuáles son las limitaciones fundamentales de rendimiento de una célula solar? En primer lugar el propio diagrama de bandas. Cuando un fotón incide sobre la célula, pueden ocurrir dos cosas: que el fotón no posea energía suficiente para bombear un electrón de la banda de valencia a la de conducción (fotones *débiles*), en cuyo caso el semiconductor es transparente a dicho fotón, y su energía se pierde, o bien que posea una energía superior a la separación *Eg* de las bandas de valencia y conducción, en cuyo caso se absorbe, desaparece y genera un par electrón-hueco muy en el interior de las mismas (fotones *fuertes*). Pero el electrón desciende rápidamente a través del diagrama de bandas, hasta situarse próximo al fondo de la banda de conducción, en tanto que el hueco asciende por la banda de valencia hasta situarse próximo a su superficie; en ambos casos se produce energía térmica. De este modo, el exceso sobre *Eg* de la energía del fotón se convierte en calor y no puede recuperarse en forma de energía eléctrica. Sólo los fotones de energía muy próxima a *Eg* pueden aprovecharse razonablemente bien.

No puede aprovecharse toda la energía de la banda prohibida *Eg*: sólo la energía potencial correspondiente al voltaje con que la célula cede, en forma de corriente, este par electrón-hueco al circuito exterior. (Energías y voltajes se expresan con los mismos valores cuando las energías se miden en electronvolts —ev— y los voltajes en volts.)

Para incrementar el voltaje conviene aumentar las generaciones mediante concentración de la luz incidente, y, luego, reducir las recombinaciones hasta forzar la mayor separación de pseudoniveles de Fermi para una corriente dada. Lo primero tiene una limitación fundamental: la máxima potencia luminosa que se puede conseguir en la Tierra es la misma que encontramos en la fotosfera solar, unas 50.000 veces la potencia luminosa que incide sobre nuestro planeta. El grupo de Roland Winston, de la Universidad de Chicago, acaba de anunciar concentraciones de 84.000x (el signo x se usa para indicar que es una potencia luminosa 84.000 veces mayor que la estándar, sin concentración de 0,1 watt por centímetro cuadrado) dentro de zafiro. Ese valor es sólo alcanzable en el interior de un medio de alto índice de refracción *n*, en cuyo caso ese límite de 50.000 puede multiplicarse por n^2; es decir, para el zafiro el límite es de 180.000x.

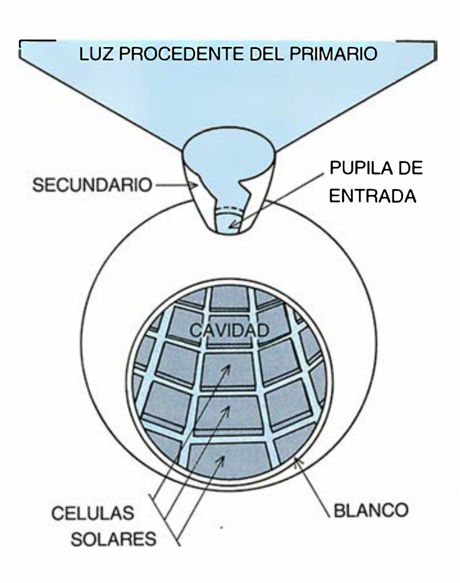
Para reducir las recombinaciones hay que atacar la causa de las mismas. Existe, sin embargo, un tipo de recombinación, la radiativa, que es inevitable porque constituye el mecanismo inverso a la absorción de fotones por el semiconductor. Según este mecanismo, cuando chocan un electrón y un hueco se les ofrece cierta probabilidad de restablecer el enlace, cayendo el electrón en la banda de valencia y haciendo desaparecer el hueco de ella. La energía liberada en este proceso se usa en la creación de un fotón con energía próxima a *Eg*. Este fotón puede ser absorbido a continuación, generando de nuevo el par electrón-hueco. Ahora bien, si el fotón se ha creado cerca de la superficie del semiconductor, puede escapar del mismo, y la recombinación resulta definitiva. Con este criterio, Hans Queisser y el premio Nobel William Shockley, por aquel entonces en la compañía Transistor Shockley de Palo Alto, determinaron en 1960 el voltaje y rendimiento máximos que se podía alcanzar en una célula solar. Requería desde luego que trabajase a la máxima concentración alcanzable, antes mencionada.

En nuestro equipo del Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid nos ocupamos, entre otras cosas, de estudiar cómo acoplar la radiación luminosa a las células solares. Siguiendo esta línea de trabajo, Gerardo L. Araújo y Antonio Martí han añadido otra condición para alcanzar el límite de rendimiento: mediante un sistema óptico apropiado, asegurarse de que todos los fotones emitidos van a ser reenviados al sol, no permitiendo, como lo hicieron Queisser y Shockley, su remisión hacia partes oscuras del universo. El límite de rendimiento se eleva así un poco. En particular, el límite de rendimiento es del 44 por ciento para una célula solar con *Eg* de 1,1 electronvolt (el silicio tiene este *Eg*). Células con menor *Eg* no consiguen voltajes suficientes; con mayor *Eg* capturan, por contra, menos fotones y presentan corrientes demasiado bajas.

Si ese rendimiento nos parece bajo no hay que desesperar. Podemos aceptarlo como el límite de rendimiento de una célula solar única, pero no como el del efecto fotovoltaico en su conjunto.

La causa principal de pérdida de rendimiento radica en que sólo se aprovechan bien los fotones con energía próxima a *Eg*. Para evitar ese derroche se fabrican múltiples células solares de materiales diferentes, cada una con su propio valor de *Eg*. Las recubrimos, una a una, con un filtro óptico que deje pasar sólo los fotones con energías próximas a su banda prohibida y refleje los otros. Todas estas células pueden colocarse entonces en una cavidad, por ejemplo una esfera hueca, donde penetre la luz, concentrada al máximo, a través de un agujero o pupila de entrada. Los fotones que no pueden entrar en una célula por causa del filtro son reflejados por éste y terminan introduciéndose en la célula apropiada, ya que encontrar la salida de la cavidad les resulta más difícil. Para ello, es necesario que el área de cualquier célula del conjunto sea mucho mayor que la de la citada pupila de entrada. Hay que disponer además de suficientes células para que cualquier fotón del espectro solar encuentre su célula adecuada.

La cavidad o esfera hueca reenvía, hacia cada célula, muchos de los fotones que se escapan de la propia célula, producidos por la recombinación radiativa. Los contados que escapan de la cavidad tornan directamente al sol por el sistema óptico, sin perderse en ninguna otra parte del universo. El rendimiento global, sumando la potencia eléctrica obtenida de cada cé-



7. BUSCANDO EL LIMITE de rendimiento. El límite teórico de rendimiento de la conversión fotovoltaica, de 86 por ciento bajo radiación extraterrestre, no se puede alcanzar con una sola célula solar sino con una infinidad de ellas, de diferentes materiales, todas limitadas por recombinación radiativa, que es inevitable, e impidiendo que escapen los fotones, bien sean incidentes bien emitidos en dicha recombinación. Para ello se puede usar el aparato ideal que muestra la figura. Cada célula está cubierta de un filtro que sólo deja pasar fotones en una estrecha banda de energía, próxima a su banda prohibida. La cavidad, sin pérdidas, sólo deja escapar fotones hacia el primario, que directamente los reenvía al sol; esta pérdida es inevitable ya que por donde entra un fotón, al iluminar la cavidad con luz solar, siempre puede salir otro. Para un funcionamiento ideal, la pupila de entrada de la cavidad debe ser mucho menor que el área de cada una de las células.

lula, es muy elevado: del 86,5 por ciento, según los cálculos de Araújo y Martí.

Sabido es que el ciclo reversible de Carnot, así llamado en honor del físico francés Sadi Carnot, se aplica al comportamiento del gas en una máquina térmica. (Consta de cuatro etapas —compresión adiabática, expansión isotérmica, expansión adiabática y compresión isotérmica— en su restablecimiento de la presión, volumen y temperatura de partida.) Si se considera el ciclo termodinámico de Carnot que da lugar al máximo de rendimiento, aplicado al caso de un depósito de calor constituido por los fotones de la fotosfera solar, a 5487 grados C, y un segundo depósito, el cristal semiconductor, a la temperatura ambiente de 27 grados C, nos da un rendimiento del 94,7 por ciento. Ocurre, sin embargo, que los fotones, en flujo continuo, no constituyen el depósito caliente necesario para ese ciclo de Carnot. Varios autores han demostrado que el mayor rendimiento alcanzable con los fotones del sol, independientemente del dispositivo que se use para extraer de ellos energía útil, coincide con el obtenido por Araújo y Martí. Lo que nos afianza en la seguridad de que el dispositivo propugnado constituye un conversor ideal de energía solar.

Por complicados que sean estos artilugios ideales, siempre nos sugieren algunas ideas prácticas. Fraas y sus colegas en el centro de alta tecnología de la compañía Boeing, en Seattle, han desarrollado dos células solares de arseniuro de galio (AsGa) y de antimoniuro de galio (SbGa), de valores respectivos de *Eg*, 1,4 y 0,7 electronvolts; las han colocado una debajo de la otra. Muchos de los fotones *débiles* que no son absorbidos por el AsGa pasan al SbGa donde, al ser *fuertes*, sí se absorben. La idea no es nueva, pero el rendimiento obtenido por Fraas y colegas llega al 35%, el máximo, según mis datos, alcanzado hasta ahora (1991).

En el mismo orden de cosas, Olson y sus colaboradores, del Instituto de Investigación de Energía Solar de Golden, han desarrollado una célula de fosfuro de galio e indio (P_2GaIn), con *Eg* alrededor de 1,9 electronvolts, crecida sobre una de AsGa (*Eg* = 1,4 electronvolt), que ha dado rendimiento conjunto de 27,3 por ciento sin concentración, el mayor conseguido hasta ahora en estas condiciones. Aunque subsisten problemas para usar esta célula en concentración, quizá combinando estas dos células con una de SbGa, la una debajo de las otras, se llegue pronto al 40 por ciento.

Estas estructuras son muy complejas y caras, incluso para utilizarlas en concentración. No puede descartarse que se consiga un abaratamiento de las mismas, pero el uso de las células de silicio, económicas y con una industria muy desarrollada, está probablemente más próximo. ¿Cuál es el rendimiento que se puede alcanzar con este material? A la respuesta de esta pregunta vamos a dedicar ahora algún espacio.

El silicio es un material algo singular, comparado con los otros semiconductores de que hemos hablado, pues es un semiconductor de banda prohibida indirecta y absorbe poco la luz. En contrapartida, la recombinación radiativa es, en él, débil; pero esto, más que ser una ventaja, es un inconveniente ya que nos hace temer que otras recombinaciones, irreversibles por naturaleza, van a ser dominantes.

En particular hay que hacer mención de la recombinación Auger, que es inevitable en los semiconductores de banda prohibida indirecta. Importa también en los de banda prohibida directa, como el AsGa, pero en estos casos es susceptible de reducción. La recombinación Auger consiste en la caída de un electrón en la banda de valencia —si allí encuentra un hueco— cediendo su energía a otro electrón o a otro hueco que anduvieren cerca. Este proceso pone en juego tres partículas, y la probabilidad de que ocurra es proporcional a pn^2 o a np^2; es decir, sólo cobra importancia cuando los electrones o los huecos son respectivamente muy abundantes. Esto ocurre en las regiones N^+ o en las P^+, y también en otras regiones menos dopadas cuando, debido a la fuerte iluminación, hay muchos electrones y huecos fotogenerados. Para células que no trabajan en concentración, donde no se cumple la

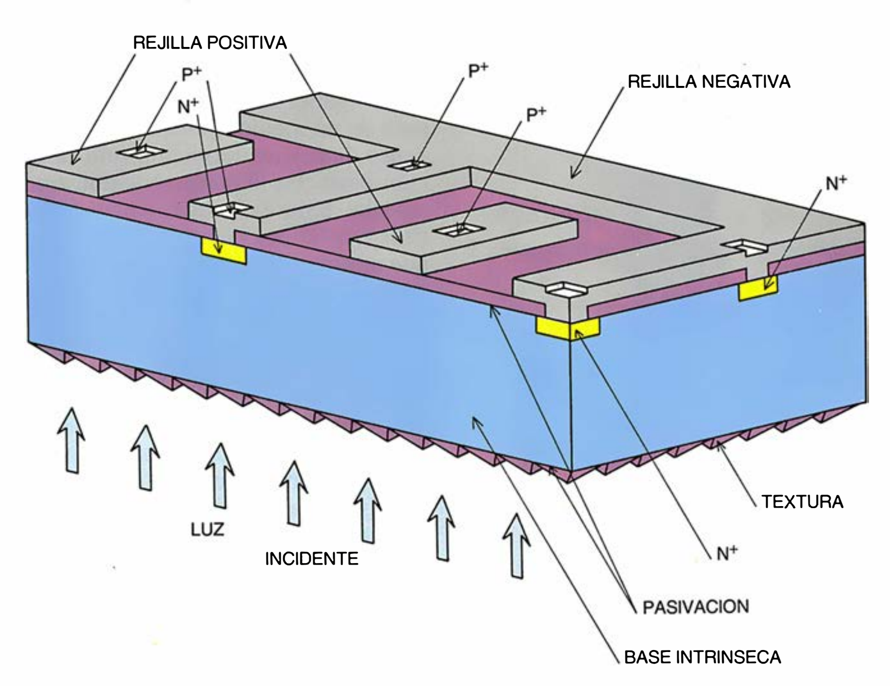
8. CELULA PERL. Esta célula, desarrollada por Martin Green y su equipo de la Universidad de Nueva Gales del Sur; ha dado un rendimiento de 24 por ciento a un sol. Anotamos las mejoras. (*a*) Superficie frontal texturada en pirámides invertidas y recubiertas de capa antirreflectante para mejorar la transmisión de la luz y su confinamiento, que se completa con la reflexión del metal posterior reforzada por la capa prorreflectante. (*b*) Area de contacto a través de agujeros en capas dieléctricas para reducir recombinación. (*c*) Superficies frontal y posterior pasivadas con las capas anti y prorreflectantes, también para reducir la recombinación. (*d*) Emisores posteriores localizados, y frontales muy delgados, con el mismo fin; debajo del contacto metálico es mejor, y así se hace, poner un emisor grueso, lo cual produce una barrera efectiva para reducir la recombinación en el contacto.

última condición mencionada, existe un dopaje óptimo de base (aunque su origen está sujeto a controversia) que determina cuándo esta recombinación es más favorable: se halla en torno a los 10^{17} átomos donadores o aceptadores por centímetro cúbico. En virtud de ello, el volumen de las regiones fuertemente dopadas de los emisores, con dopajes en el rango de 10^{18}-10^{20} átomos dopantes por centímetro cúbico deben reducirse al máximo.

Pero no es éste el único mecanismo de recombinación. El más común es el descrito en 1952 por Shockley, Read y Hall, que establece que ciertas impurezas o imperfecciones en el semiconductor actúan como trampas o centros de recombinación. En una región N los electrones llegan a las trampas, son capturados y les ceden su energía en forma de vibración (que luego se convierte en calor). Estas trampas quedan activadas y, cuando un hueco aparece cercano, depositan allí el electrón retenido, cediendo la nueva energía del proceso en forma de vibración. La trampa queda desactivada. Pero se vuelve a activar de inmediato. La probabilidad de que esta recombinación se produzca es proporcional, simplemente, a la densidad de huecos p. Por razones similares, la probabilidad de recombinación en una región P es proporcional a n. Esta recombinación es también proporcional a la densidad de trampas; rebajando ésta, disminuye también la recombinación.

En el silicio de la más alta calidad disponible hoy día, esta recombinación, en otros casos dominante, es muy baja. Ahora bien, las superficies donde se produce una ruptura abrupta de la estructura cristalina son eficacísimas de zonas del mecanismo de recombinación descrito por Schockley, Read y Hall. Es verdad que recubriendo el silicio con óxido de silicio dicha recombinación se puede evitar en buena parte; se habla entonces de "pasivar" la superficie. En las capas metálicas de contacto, la recombinación es altísima; por ello conviene reducir al máximo la superficie de contacto de los electrodos con el metal.

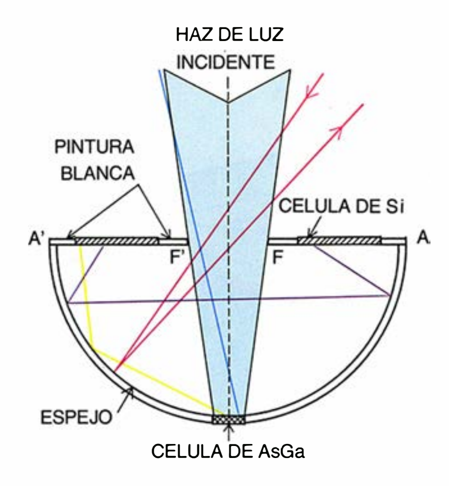
Para limitar la recombinación en las superficies, en contacto o no con metal, se las recubre con capas fuertemente dopadas de semiconductor, reduciendo así las densidades de portadores minoritarios — electrones en las regiones P^+ y huecos en las N^+— junto a las superficies. Cuando hay metal en la superficie esta opción es obvia y proporciona una justificación adicional de su uso para establecer contactos. Si la superficie está cubierta de un pasivante (óxido de silicio sobre silicio) podría resultar peor el remedio que la enfermedad, al añadir la recombinación Auger de esta capa fuertemente dopada.



9. CELULA PC. Esta célula, desarrollada por Dick Swanson y su equipo de la Universidad de Stanford, ha alcanzado en concentración, a 150 soles, un rendimiento del 28 por ciento. Tiene los emisores N^+ y P^+ en la cara posterior y localizados, para reducir recombinaciones; de este modo ambas rejillas metálicas de conexión, la positiva y la negativa, se pueden colocar en la cara posterior, evitando las sombras que produce la rejilla frontal. Además, la célula está recubierta por ambas caras con una capa pasivante, que a la vez es antirreflectante en la frontal y prorreflectante en la posterior, mejorando, esta última, la reflexión de la luz en las propias rejillas metálicas. La superficie frontal está texturizada, en forma de pirámides. Esta célula requiere recombinaciones muy bajas en la base.

Ha llegado el momento de explicar la célula PERL desarrollada por Martin Green y sus colaboradores en la Universidad de Nueva Gales del Sur. A una radiación solar estándar de 0,1 watts por centímetro cuadrado (sin concentración) ha alcanzado un rendimiento del 24 por ciento. En esa célula, los electrodos metálicos de delante y detrás están conectados, a través de pequeños agujeros hechos en un óxido aislante y pasivador, a regiones P^+ en la parte posterior y N^+ en la frontal, que no cubren la superficie entera de la célula, sino que se extienden sólo debajo de los propios agujeros de contacto. En la superficie frontal existe, sin embargo, una fina capa N^+, recubriéndola; esta capa, capaz de limitar la recombinación de superficie, es indispensable en la célula PERL para favorecer la conducción lateral de la corriente hasta alcanzar las tiras de la rejilla de contacto que están bastante separadas. Esto es así porque la región N^+ es bastante buena conductora de la corriente de electrones, que es la que ha de salir por los contactos frontales, lo que no sucede con la base de tipo P. Todas las superficies, salvo los puntos de contacto, están "pasivadas" con una capa de óxido de silicio.

Quizá los más llamativo de esta célula sea su compleja estructura superior, tachonada de pirámides invertidas. Esta estructura se consigue con relativa facilidad en el monocristal de silicio mediante un ataque químico anisotrópico. Sirven estas pirámides, en primer lugar, para reducir la reflexión de la luz en el silicio, que desnudo y sin tratar refleja cerca del 40 por ciento de la luz incidente. Cuando se recubre con una capa transparente de espesor próximo al cuarto de longitud de onda de los fotones del sol (unas 0,1 micras) actúa como las capas anti-reflectantes (AR) usadas también para gafas, y reduce la reflexión a sólo 10-15 por ciento. (Un tratamiento con doble capa AR puede bajar la reflexión a sólo el 3-4 por ciento.) En esta célula se usa el propio óxido de silicio como capa AR, aunque dicho material no es óptimo para tal función. Sin embargo, la estructura de pirámides determina que la mayoría de los rayos solares reflejados (todos, si la luz cae perpendicular) vuelven a incidir sobre otras caras de las pirámides, teniendo una nueva ocasión de penetrar en la célula. La reflexión



10. EL OJO FOTOVOLTAICO. Es un artilugio que estamos desarrollando en la Universidad Politécnica de Madrid, en colaboración con otros centros europeos en el seno del Programa JOULE de la CEE, consistente en una cavidad cuya función es análoga a la indicada en la figura 7, y dos células, una de arseniuro de galio y otra de silicio. El objetivo, aún no conseguido, es alcanzar rendimientos del orden del 33 por ciento. Una peculiaridad de esta cavidad es que consigue el confinamiento de luz pese a tener una gran pupila de entrada, por no poder escapar los rayos rasantes, según un concepto que estamos desarrollando Juan Carlos Miñano y yo. En esta cavidad hay cuatro clases de rayos: (*a*) rayos que unen la pupila de entrada consigo misma, que no son introducidos en ella; (*b*) rayos que unen la pupila de entrada con la célula de AsGa, que se introducen con un espejo o lente especial y que, invertidos de sentido, son los unicos que pueden escapar; (*c*) rayos que unen la célula de AsGa con la tapa (donde están las células de silicio), y (*d*) rayos que unen la tapa consigo misma. No existen rayos uniendo la tapa con la entrada.

global es del orden 0,15 × 0,15 = 0,0225, es decir, del 2,25 por ciento, o menos.

La segunda misión de esta estructura, más sutil, se refiere al confinamiento de la luz. Para conseguirlo, hemos de colocar un buen espejo en la cara posterior de la célula. Cumple esa misión la capa metálica del electrodo posterior (plata o aluminio). Se mejora así la reflectividad de esta capa, hasta un 98 por ciento, con la capa de óxido pasivante allí colocada, a la que se debe dar un espesor bien definido, del orden de 0,1 micras. De este modo, cada rayo de luz que entre en la célula se inclina por la refracción en las caras de las pirámides, se refleja en la cara posterior y vuelve a la cara frontal, donde muy probablemente encuentra una cara de pirámide; en ésta incide con cierto ángulo.

Cuando la luz procedente de un medio ópticamente denso (de índice de refracción *n* elevado, 3,7 en el semiconductor) incide con cierta inclinación sobre la superficie que lo separa de un medio ópticamente menos denso (aire), experimenta una reflexión perfecta, llamada reflexión total interna. Esto es lo que ocurre a muchos (¿el 92 por ciento?) de los rayos que intentan escapar de la célula. Con estas condiciones los rayos experimentan recorridos que en promedio (y en una estructura algo idealizada) son de $4n^2$ veces el espesor de la célula (en silicio 55). Así, los fotones poco absorbidos, que —como hemos dicho— en el silicio son bastantes, recorren distancias suficientes para serlo, a pesar de la delgadez de la célula.

El mayor rendimiento en concentración, para células de silicio, lo ostenta hoy, con un 28 por ciento desde 1986, la estructura de célula PC ("point contact") desarrollada por Dick Swanson y su equipo de la Universidad de Stanford. Emplea refinamientos parecidos en el tratamiento óptico de las superficies. Peculiar de esta célula es tener todos sus contactos en la cara posterior, con lo cual la frontal queda libre de la malla de metalización y no sufre, por ende, la sombra que ésta arroja.

Contra lo que suele creerse, el tener los contactos en la cara posterior no constituye ningún problema, si la calidad del silicio es buena. Nosotros desarrollamos en 1981 una célula bifacial que podía ser iluminada por detrás (por la cara opuesta a la que tiene la unión PN^+), que, con nuestras patentes, fabrica hoy la sociedad española Isofotón. Por otra parte, la célula PC ha sido la primera en utilizar el concepto de contacto puntual sobre pequeñas zonas fuertemente dopadas.

Uno de los problemas de las célula de silicio en concentración es su resistencia en serie. Produce pérdidas que influyen en el rendimiento. De hecho, considerando la resistencia en serie, el rendimiento máximo se consigue a la concentración que hace que la caída de potencial en esta resistencia sea igual a la energía térmica, a temperatura ambiente de 25 milivolts. Para concentraciones superiores, el rendimiento empieza a disminuir, a diferencia de lo que ocurría con las células ideales, sin resistencia, que analizamos antes.

La resistencia en serie se produce en diversos lugares de la célula. En la mayoría de los casos, sin embargo, con una buena técnica puede reducirse bastante; en teoría, incluso indefinidamente. Sólo una componente se muestra inevitable: la que produce la corriente, al atravesarla de arriba abajo. En la célula PC, los contactos están por detrás; por tanto, esa componente no existe y la resistencia en serie es bajísima. Gracias a ello trabaja muy bien a concentraciones elevadas. Se ha obtenido así el 28 % a 150 soles; su operación a 300 soles parece posible, si se adelgaza la célula hasta el punto de permitir reducir el volumen de la recombinación Auger a la que esta célula es muy sensible. (Las células de AsGa no tienen ese problema, porque la movilidad de los electrones en el AsGa quintuplica la del silicio. En consecuencia, en el arseniuro de galio son posibles las concentraciones de 750-1000x, y desde luego son necesarias si se quieren soluciones económicas, ya que el AsGa es más caro que el silicio.)

Las células solares encontrarán un futuro prometedor en su introducción dentro de cavidades confinadoras de luz. Ello les permite tener mallas metálicas muy densas y reducir, por consiguiente, su resistencia en serie, ya que la luz reflejada puede retornar a las células. Además, en el caso de células hechas con el transparente silicio, la luz que, entrando en ellas, escapa sin absorber, cuenta también con la posibilidad de entrar de nuevo en ellas, aumentando el camino óptico, hasta valores quizás del orden de 500 veces el espesor de la célula. Se puede fabricar así células muy finas, con merma apreciable de la resistencia en serie. Según mis cálculos, fuera de cavidad el silicio alcanza, con las técnicas de confinamiento antes mencionadas, corrientes de 42 miliampères a potencias luminosas de 0,1 watts; en el interior de una cavidad ideal, llega a los 45 miliampères. Significa todo esto que, usando estas cavidades, se lograrían rendimientos parecidos a los de la célula PC; y ello, con células más sencillas y baratas. No se olvide, además, que una misma cavidad admite células de varios materiales que potencien el rendimiento.

Para que la luz no escape, las cavidades necesitan, y en ello reside su problema principal, una pupila de entrada muy pequeña con concentración muy elevada. Para salir al paso de esa dificultad, he desarrollado con Juan Carlos Miñano un nuevo tipo de confinamiento de luz con sistemas ópticos especiales, en el que sólo pueden salir de la cavidad rayos poco inclinados. De este modo la pupila de entrada puede ser grande y, la cavidad, confinar la luz; impide entonces que escape, como si dicha entrada fuera mucho menor. Basado en ese modelo, un consorcio adscrito al Programa JOULE de la CEE, dirigido por

nuestro Instituto, y en el que se integran la Universidad de Reading, al Instituto Fraunhofer de Energía Solar de Friburgo y a la empresa CISE de Roma, está desarrollando un sistema para uso combinado de células de AsGa y Si, que pretende superar el rendimiento máximo alcanzado con estos dos materiales, que es del 31 por ciento. El interés del par AsGa/Si reside en el bajo precio de las células del segundo material, que puede justificar la complejidad de usarlas juntamente con las de AsGa.

Resumiendo, podemos decir que el aumento de rendimientos de las células solares no sólo es viable, sino que cabe esperar en los próximos años valores superiores al 40 por ciento en laboratorio. Con un rendimiento de un 35 por ciento, un metro cuadrado de módulo fotovoltaico (conjunto formado por las células y la estructura óptica necesarias) ahorra del orden de un barril de petróleo por año. Un panel de expertos reunidos por EPRI (la agrupación de investigación de las compañías eléctricas estadounidenses) en 1989, antes de la crisis del golfo Pérsico, opinaron que era muy probable que se consiguieran los costes de instalación y los rendimientos que hacen posible la producción de electricidad en centrales norteamericanas a 8 centavos de dólar por kilowatt-hora usando la tecnología de concentración con silicio de alto rendimiento. Ninguna otra técnica fotovoltaica les pareció más idónea para alcanzar el binomio coste-rendimiento requerido. Sólo expresaron ligeras dudas sobre el cumplimiento, por parte de la concentración, de los requisitos de fiabilidad necesarios para reducir los costes de explotación.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SOLAR CELLS. Martin A. Green. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey; 1982.

HIGH EFFICIENCY SILICON SOLAR CELLS. Martin A. Green. Trans Tech, Aedermannsdorf; 1987.

SOLAR CELLS AND OPTICS FOR PHOTOVOLTAIC CONCENTRATION. Antonio Luque. Adam Hilger, Bristol; 1989. (Contiene 7 capítulos del autor y otros 7 preparados por G. L. Araújo, A. Cuevas, E. Lorenzo, J. C. Miñano, J. M. Ruiz y G. Sala.)

PHYSICAL LIMITS TO PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION. Dirigido por Antonio Luque y Gerardo L. Araújo. Adam Hilger, Bristol; 1990. (Incluye contribuciones de los directores de la obra y de P. Landsberg, R. Mertens, J. C. Miñano, J. Parrott y W. Welford.)

Estructura de los cuasicristales

Los cuasicristales no están ordenados uniformemente como los cristales, ni son amorfos como los vidrios. Se pueden explicar muchos de sus rasgos distintivos, pero su estructura atómica permanece en el misterio

Peter W. Stephens y Alan I. Goldman

Cuando el aluminio, cobre y hierro se funden juntos y se enfrían rápidamente, pueden solidificar en forma de grano con la figura de un dodecaedro perfecto, sólido geométrico con doce caras pentagonales regulares. Aunque estos granos dodecaédricos semejan un cristal, distan mucho de serlo. Los cristales se componen de celdas unitarias, bloques idénticos que poseen, cada uno, la misma distribución de átomos y se encajan con sus vecinos de la misma manera. Pero no podemos construir un grano dodecaédrico con átomos dispuestos en celdas unitarias de una forma exclusiva, sean aquéllas cubos o incluso dodecaedros. El grano dodecaédrico es un cuasicristal.

En efecto, todas las investigaciones de la estructura a escala atómica muestran que los cuasicristales no están compuestos por celdas unitarias repetidas. Es evidente que estos nuevos y sorprendentes materiales no pueden ser cristales, pero no es evidente a primera vista qué sean. A medida que los físicos, químicos y científicos de materiales se fueron adentrando en las estructuras de los cuasicristales, percibieron que los cristales periódicos, cuyas estructuras atómicas han sido objeto de estudio desde hace 78 años, constituían un subconjunto más de los posibles tipos de sólidos ordenados.

Desde 1984, cuando Dan E. Shechtman y sus colegas, del estadounidense Instituto Nacional de Normalización y Certificación (INNC), descubrieron el primer cuasicristal, los investigadores han fabricado muchas clases distintas de aleaciones cuasicristalinas. Han aprendido a mejorar las muestras, hasta el punto de que pueden estudiar cuantitativamente asuntos que, siete años atrás, pertenecían al reino de la especulación. Se han ido configurando tres teorías sobre la estructura de los cuasicristales: modelo de Penrose, del vidrio y modelo de las teselaciones aleatorias.

El modelo de Penrose —derivado del trabajo del matemático Roger Penrose, de la Universidad de Oxford— sugiere que los cuasicristales se componen de dos o más celdas unitarias que se acoplan en virtud de reglas específicas. Aunque da cuenta precisa de algunas propiedades básicas de los cuasicristales, halla dificultad para explicar la conexión de tales reglas con los procesos de crecimiento atómico.

El modelo del vidrio, por su parte, se apoya en las interacciones locales para unir de modo un tanto aleatorio agregados de átomos. De acuerdo con el modelo, todos los agregados poseen la misma orientación; ahora bien, por culpa del crecimiento aleatorio, la estructura contiene muchos defectos.

Los dos modelos precedentes convergen, así parece, hacia un tercero, el de las teselaciones aleatorias, que combina las mejores características de uno y otro. La estructura de los cuasicristales se ha convertido, a lo largo de los últimos años, en uno de los asuntos más acaloradamente discutidos en la física del estado sólido. La resolución del debate podría aportar una teoría de la estructura cuasicristalina y guiar el desarrollo de materiales con propiedades eléctricas y estructurales sorprendentes.

Para producir el primer cuasicristal, Shechtman y sus colegas del INNC fundieron aluminio y manganeso y lanzaron los metales fundidos contra una rueda que giraba rápidamente, logrando así una velocidad de enfriamiento de aproximadamente un millón de grados Kelvin por segundo. Este proceso de enfriamiento brusco al temple ("quenching") confiere a la aleación múltiples estructuras o fases nuevas. Para entender la naturaleza de fases tan insólitas de la materia, conviene dominar ciertos principios de cristalografía fundamental.

Un cristal puede poseer sólo determinadas simetrías, ya que hay un



1. EL CUASICRISTAL (*derecha*) se distingue de otras estructuras por su sorprendente simetría. El material puede engendrar granos en forma de dodecaedros, sólidos cuyas doce caras son pentágonos regulares. El grano dodecaédrico posee simetría de orden cinco; esto es, cuando se le gira un quinto de circunferencia alrededor de un eje que atraviesa una de sus caras, su forma no cambia. El grano está compuesto de aluminio-cobre-hierro y mide unas 300 micras de diámetro. La micrografía electrónica (*arriba*), que muestra un corte de varias capas atómicas, también exhibe simetría de orden cinco.

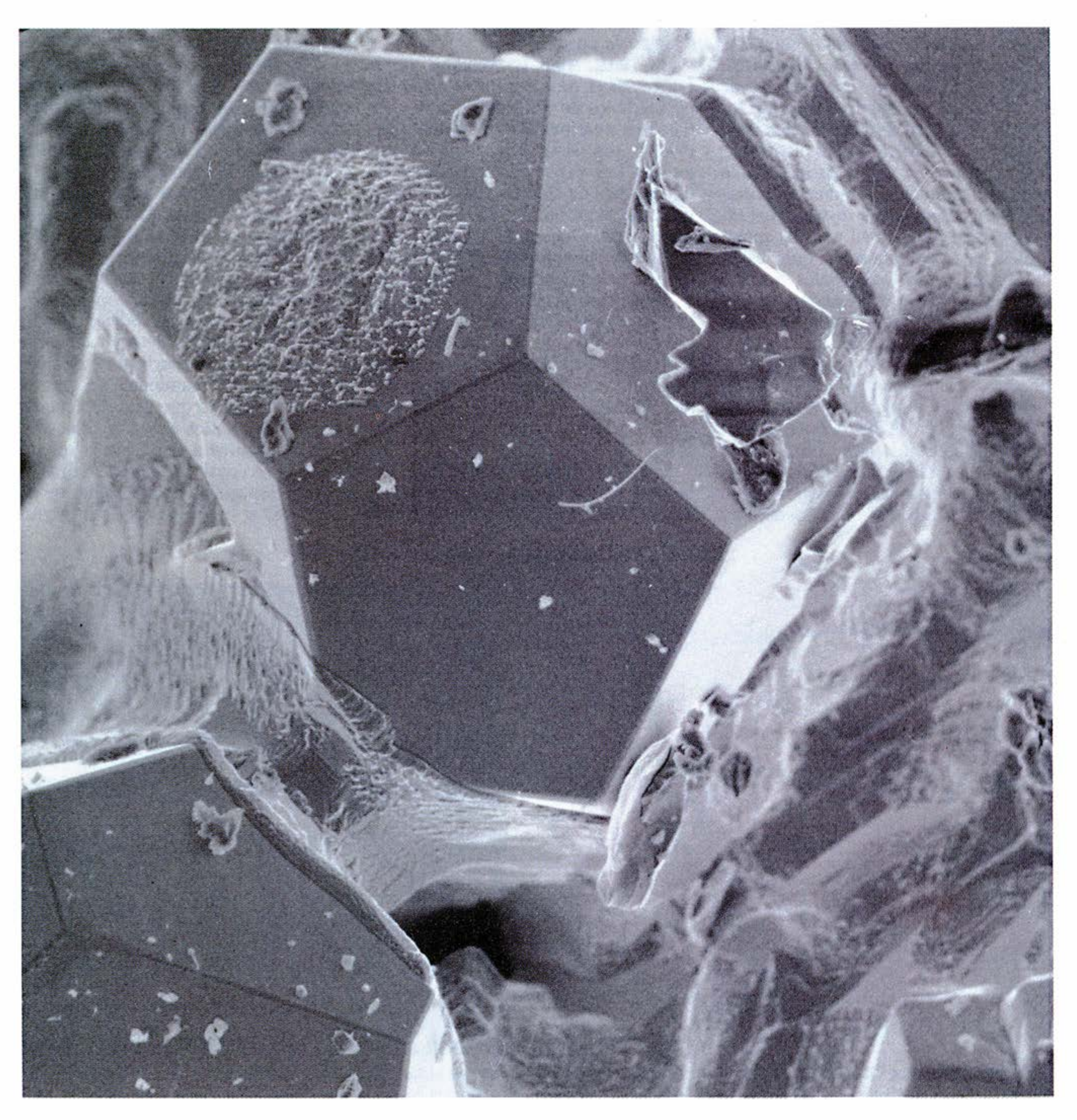
PETER W. STEPHENS y ALAN I. GOLDMAN, que han colaborado en muchos proyectos durante los últimos 10 años, comparten ahora un intenso interés en los cuasicristales. Stephens es profesor de física en la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook. El año que ha pasado en la Universidad nipona de Tohoku lo ha dedicado a la investigación experimental, algunos de cuyos resultados recoge aquí. Goldman, que se doctoró en Stony Brook, enseña física en la Universidad estatal de Iowa e investiga en el Laboratorio Ames.

número limitado de agrupaciones posibles de las celdas unitarias para constituir un sólido. Demos un ejemplo. Un cristal de sal común consta de celdas unitarias cúbicas que se almacenan en forma de granos cúbicos; el cristal presenta, pues, simetría de rotación cuaternaria: cuando se gira el cristal un cuarto de vuelta alrededor de los ejes apropiados, los átomos de los cristales girados ocupan las mismas posiciones que en el cristal sin girar. Los cristales poseen simetrías de orden dos, tres, cuatro y seis; ninguna más.

Un cristal no puede nunca tener simetría de orden cinco, porque una celda unitaria singular que la portara, tal como un dodecaedro, no podría llenar completamente el espacio por simple ensamblamiento. Habría siempre huecos entre las celdas unitarias dodecaédricas.

Para determinar la estructura de un cristal, se suele recurrir a una técnica indirecta, fácilmente inteligible. Los átomos de un cristal están colocados en familias de planos paralelos. Cada una de ellas actúa como un espejo capaz de recibir y reflejar rayos X, electrones o partículas que viajan, en forma de ondas, por el espacio. Cada plano refleja las ondas incidentes muy débilmente. Pero, si las ondas reflejadas por cada miembro de una familia de planos están en fase, la intensidad total de la onda reflejada puede adquirir cierta entidad. Este fenómeno se llama difracción; ocurre siempre que una onda interacciona con una estructura ordenada que posee intervalos adecuados.

Cuando bombardeamos un cristal con un haz de rayos X o de electrones, los ángulos a través de los cuales se difractan las ondas muestran la forma y las dimensiones de las celdas unitarias del cristal. Las ondas difractadas pueden recogerse, por ejemplo, sobre una emulsión fotográfica, apareciendo como una red de puntos luminosos.



Todas las simetrías de un cristal están reproducidas en su red de difracción. Un cristal con simetría rotacional de orden seis producirá una red de difracción que también tiene simetría de orden seis. Como ningún cristal puede poseer simetría quinaria, no cabe esperar ver una red de difracción dotada con simetría rotacional de orden cinco.

Sin embargo, cuando Shechtman y sus colaboradores iluminaron un grano de aleación de aluminio-manganeso con electrones, encontraron una red de difracción que tenía una simetría rotacional de orden cinco. En efecto, girando la muestra los ángulos apropiados, dedujeron que la aleación presentaba seis ejes de simetría de orden cinco. En términos técnicos, la aleación tenía simetría icosaédrica, porque un icosaedro es un sólido de veinte caras que tiene seis ejes de rotación de orden cinco con la misma orientación relativa que la aleación.

Las aleaciones icosaédricas son una más de las muchas familias de cuasicristales descubiertas durante los últimos siete años. Todos estos materiales poseen simetrías que están "prohibidas" en los cristales convencionales. Leonid A. Bendersky, del INNC, encontró que el aluminio y el manganeso constituían un material que es periódico a lo largo de una dirección y tiene simetría rotacional de orden diez en el plano perpendicular; recientemente, se ha obtenido también cuasicristales con simetrías de orden ocho y doce. En el mismo sentido, los cuasicristales proporcionan un eslabón entre el orden cristalino y el cuasicristalino. Demuestran, además, que el fenómeno de la cuasicristalinidad trasciende la noción de simetría icosaédrica y la de estabilidad de los agregados icosaédricos de átomos.

El primer modelo para los cuasicristales nació de la matemática de las teselaciones, un campo introducido por Penrose y otros en la década de los setenta. Penrose analizó el acoplamiento cuasiperiódico de dos o más figuras para teselar un plano, esto es, cubrirlo completamente con figuras que no se solapen. Cada mosaico de Penrose, o teselación cuasiperiódica, podría construirse mediante un conjunto de instrucciones: las "reglas de ajuste".

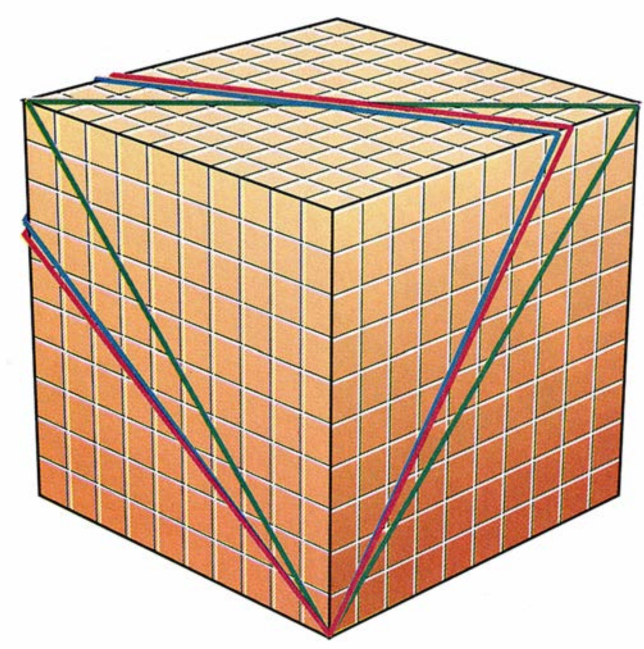
En 1982, Alan L. Mackay, de la Universidad de Londres, calculó las propiedades de difracción de una estructura cuasiperiódica teórica. Demostró que, si se colocaban los átomos en los vértices de cada tesela de un mosaico de Penrose, se originaría una red de difracción de simetría de orden diez. Dos años después, Peter Kramer y Reinhardt Neri, de la Universidad de Tübingen, extrapolaron el concepto de mosaico de Penrose bidimensional a tridimensional. Dov Levine y Paul J. Steinhardt, de la Universidad de Pennsylvania, consideraron también la posibilidad de formas alternativas de ordenación atómica basadas en los mosaicos de Penrose.

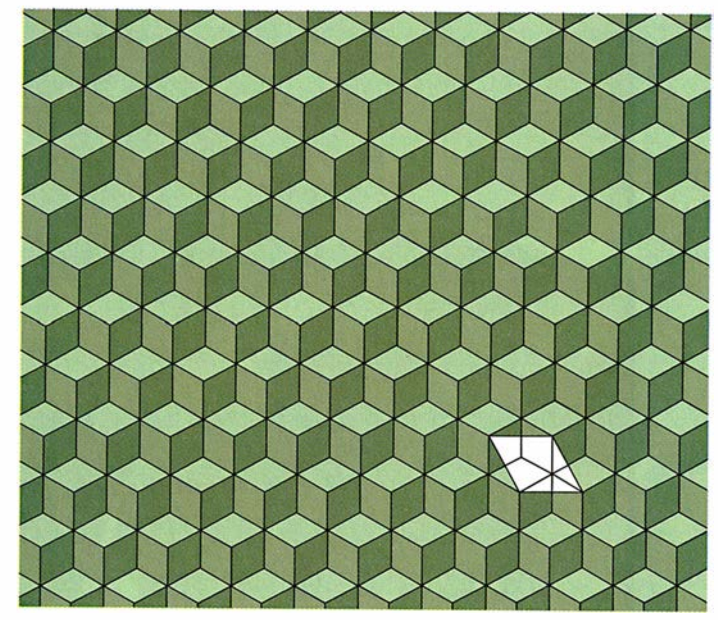
Partiendo de este trabajo seminal, Levine y Steinhardt propusieron el modelo de Penrose para los cuasicristales, transcurridas apenas seis semanas de la publicación del famoso artículo de Shechtman y colaboradores. Generalizaron a tres dimensiones el mosaico de Penrose que describe la estructura de la aleación de aluminio-manganeso, y mostraron que la red de difracción obtenida con su modelo concordaba con los resultados de Shechtman.

Los cuasicristales de Penrose están formados por un conjunto de celdas unitarias y reglas de ajuste específicas que dictan el modo de acoplarse. Estas reglas son más complicadas que la simple repetición de las celdas unitarias idénticas que forman un cristal. Tres características importantes distinguen, del cristal, al cuasicristal de Penrose.

En primer lugar, un cuasicristal de Penrose contiene muchas regiones que muestran explícitamente simetrías rotacionales prohibidas, esto es, de orden cinco. En segundo lugar, un cuasicristal de Penrose está construido a partir de dos o más celdas unitarias, en vez de la única celda que basta en el caso de cristales periódicos. En tercer lugar, un cuasicristal de Penrose no posee filas de puntos de la red a intervalos iguales, como ocurre en las estructuras periódicas. Ahora bien, los diagramas de difracción que resultan de un cuasicristal de Penrose tienen un ordenamiento de puntos bien definido, lo que está de acuerdo con los resultados experimentales.

Acertaremos a describir la estructura de los cuasicristales de Penrose y sus correspondientes diagramas de difracción, si entendemos esas estruc-





2. OBTENDREMOS UNA PAUTA PERIODICA O CUASIPERIODICA si cortamos un apilamiento de cubos por un plano (*izquierda*). La intersección del plano verde con los cubos forma la figura verde de la derecha. Esta figura es periódica: puede ensamblarse duplicando y colocando la cel-

turas como el resultado de escoger una banda o sección en una red de dimensión mayor. Este concepto admite una representación más sencilla en dos dimensiones.

Imaginemos una red bidimensional compuesta de puntos en las esquinas de una malla de cuadrados. Se recubre una línea horizontal de estos puntos por medio de una banda. Si los puntos recubiertos se proyectan sobre una línea paralela a la banda, los puntos proyectados mantendrán sus intervalos de separación a lo largo de la línea. Estos puntos definen una secuencia periódica, porque dividen la línea en segmentos de igual longitud. Para producir una secuencia cuasiperiódica, la banda deberá inclinarse con respecto a la red, de suerte tal que ofrezca una pendiente igual a un número irracional. (Se dice que un número es irracional si, cuando se expresa en forma decimal, no existe un conjunto consecutivo de dígitos que se repita indefinidamente. Por ejemplo, el número π, o 3,1415...) En este último caso, si los puntos cubiertos por la banda se proyectan sobre una línea paralela a ella, los puntos proyectados dividirán la línea en secuencias cuasiperiódicas de segmentos cortos y largos.

Esta secuencia sirve de modelo unidimensional de un cuasicristal, si colocamos imaginariamente un átomo en cada punto que divide la línea en segmentos cortos y largos. Al igual que otros cuasicristales, la secuencia cuasiperiódica tiene propiedades de difracción insólitas. Podría imaginarse que el modelo unidimensional generaría un diagrama de difracción difuso porque los átomos no guardan un espaciado periódico. Pero cálculos rigurosos prueban lo contrario. De hecho, la secuencia cuasiperiódica produce un diagrama de difracción nítido, en virtud de la periodicidad de la red original de dos dimensiones.

El diagrama de difracción derivado de la secuencia cuasiperiódica consiste en un conjunto denso de picos fuertes y débiles. En los experimentos, se detectan sólo los picos más fuertes. A pesar de lo cual, podemos seguir demostrando que la secuencia cuasiperiódica no es un cristal por culpa del espaciado aperiódico entre los picos observables.

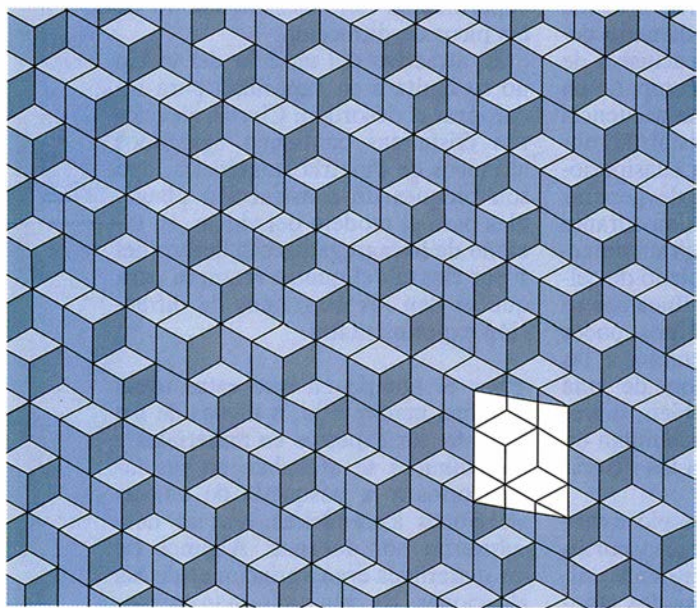
Para crear estructuras cuasiperiódicas en dos dimensiones, se necesita una red en un espacio de dimensión todavía mayor. Por ejemplo, un plano que atraviesa un apilamiento de cubos bajo cierto ángulo formaría una estructura bidimensional cuasiperiódica si la pendiente entre el plano y los ejes del cubo fuera un número irracional. (Con la proyección desde una red pentadimensional podemos generar un mosaico de Penrose bidimensional y dotado de simetría de orden cinco.)

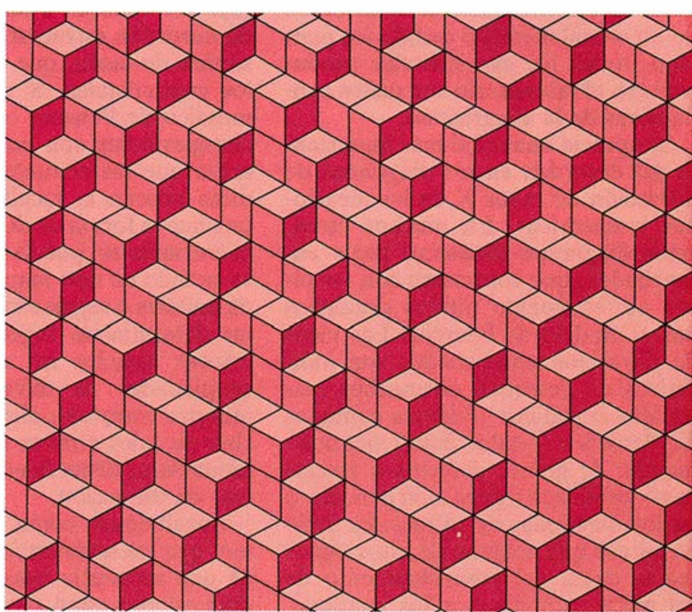
Usando un razonamiento similar, se asocian los cuasicristales icosaédricos con un corte tridimensional en una red abstracta de seis dimensiones. Este tipo de corte conduce a una clase de estructuras cuasiperiódicas propuesta en el modelo de Penrose. Descritos así los cuasicristales, no hay dificultad en admitir sus simetrías insólitas, que, sin embargo, no contradicen los preceptos de la cristalografía. Mientras que las simetrías posibles de los diagramas de difracción de los cristales están limitadas por las simetrías posibles de los propios cristales, las simetrías de los cuasicristales derivan de las de una red emparentada de mayor dimensión.

En general, y debido al orden periódico de la red emparentada de más alta dimensión, una estructura cuasiperiódica dará lugar a un diagrama de difracción portador de un gran orden.

Aunque el modelo de Penrose puede predecir con bastante exactitud los diagramas de difracción generados por aleaciones icosaédricas, da pocas pistas sobre cómo se relacionan la realidad física, los espacios multidimensionales y las reglas de ajuste. En particular, aunque estas últimas sean locales, se requiere una gavilla de normas para construir un perfecto cuasicristal de Penrose. El crecimiento de tales cuasicristales exige la interacción entre átomos de celdas unitarias muy distantes para comunicar sus posiciones y orientaciones relativas. Esta idea es contraria a las nociones generalmente aceptadas sobre las fuerzas de formación de los cristales, de alcance relativamente corto.

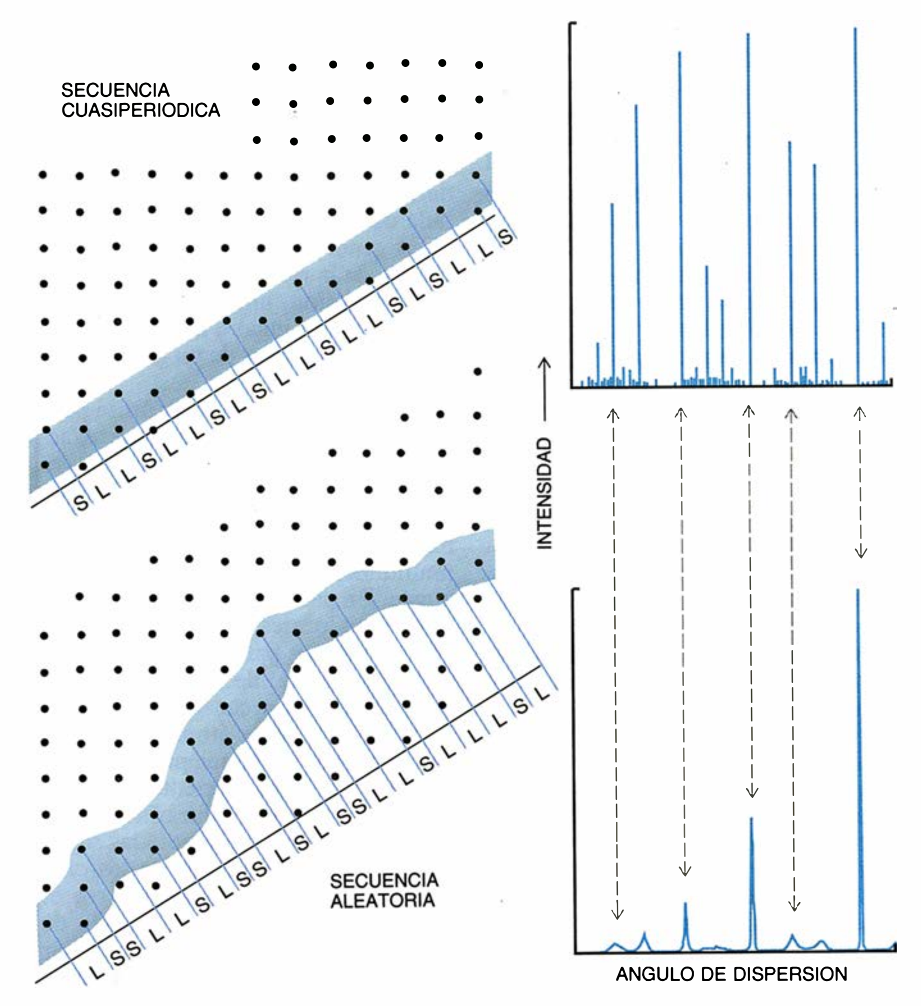
Se le objeta también al modelo de Penrose su incapacidad para explicar el considerable desorden que se hace evidente en casi todos los cuasicristales. Este desorden aparece en sus propiedades estructurales, eléctricas y de difracción. Por citar un ejemplo: de acuerdo con el modelo de Penrose, el cuasicristal perfecto debería con-







da unidad (*blanco*) de una forma ordenada. La figura azul es periódica; la roja, imposible de construir a partir de una celda unidad, es cuasiperiódica. El que una figura sea periódica o cuasiperiódica dependerá del ángulo de corte. La pendiente del plano rojo es un número irracional.



3. SE FORMA UNA SECUENCIA CUASIPERIODICA de segmentos cortos y largos (*superior izquierda*) cuando una banda recubre una red con una pendiente igual a un número irracional. Específicamente, la pendiente es el inverso del número áureo, o aproximadamente 0,618. La secuencia genera una figura de difracción nítida (*superior derecha*). Un camino zigzagueante a través de la red produce una secuencia aleatoria (*inferior izquierda*). A pesar de este desorden, la figura de difracción de la secuencia aleatoria (*inferior derecha*) es similar a la de la secuencia periódica.

ducir la electricidad con la facilidad de un cristal metálico ordinario; pues bien, todos los cuasicristales producidos en el laboratorio son malos conductores de la electricidad.

Se aprecia una señal más importante del desorden en los diagramas de difracción de rayos X de las aleaciones icosaédricas. En muchos casos, estos diagramas muestran picos ensanchados, que contrastan con los picos perfectamente nítidos predichos por el modelo de Penrose. Los picos de difracción ensanchados son indicativos de desorden en muchos materiales cristalinos. Fuentes comunes de desorden —tales como pequeño tamaño de grano, defectos o tensiones— producen signos bien conocidos en los diagramas de difracción. Pero no parece que ninguno de estos signos sea la causa del ensanchamiento de los picos exhibida por los cuasicristales.

Los resultados de la difracción de rayos X apuntan a una nueva forma de desorden estructural, llamado desorden de fasón, que es exclusivo de los cuasicristales. Si se compara un mosaico de Penrose o una secuencia cuasiperiódica con un cristal, se observa que las estructuras cuasiperiódicas poseen la facultad de generar una nueva forma de desorden durante el crecimiento: puede surgir un defecto cuando un tipo inapropiado de celda unitaria o segmento de línea cae en un determinado lugar. Unos pocos errores aislados no afectarán a las propiedades de difracción de una muestra completa; ahora bien, si muchos de tales errores se acumulan en la muestra, distorsionarán los diagramas de difracción.

Imaginemos, como ejemplo extremo, que los segmentos largos y cortos de una secuencia cuasiperiódica unidimensional estén reordenados completamente al azar. Para nuestra sorpresa, esta secuencia aleatoria dará lugar a un diagrama de difracción bastante similar al diagrama derivado de la secuencia cuasiperiódica original. Los picos de difracción de la secuencia aleatoria se hallarán en las mismas posiciones que los de la secuencia cuasiperiódica, aunque ensanchados. De hecho, las anchuras de estos picos guardarán una relación inversa con las intensidades de los picos de difracción correspondientes de la secuencia cuasiperiódica, de manera que sólo permanecerán los picos más intensos. La existencia, en la secuencia aleatoria, de picos de difracción relativamente nítidos corroborará que la cuasiperiodicidad puede sobrevivir al desorden.

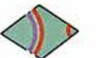
Tales ideas permitieron a los autores sugerir en 1986 que las aleaciones icosaédricas tenían una estructura intrínsecamente defectuosa. Así nació el modelo del vidrio icosaédrico, como dio en llamarse a nuestra propuesta, en la que el azar interviene de dos formas distintas. Primero, elimina la necesidad de las misteriosas reglas de ajuste y proporciona una explicación más plausible del crecimiento cuasicristalino. Segundo, el desorden introducido por el azar se asemeja mucho al evidenciado por el ensanchamiento de los picos de los diagramas de difracción. Curiosamente, poco después del descubrimiento de los cuasicristales, Shechtman e Ilan Blech, del Instituto de Tecnología de Haifa de Israel, sugirieron que los cuasicristales icosaédricos estaban compuestos de agregados icosaédricos conectados aleatoriamente. Esta teoría fue perfeccionada por los autores hasta tal punto, que logramos reproducir la observación experimental del ensanchamiento de los picos de difracción.

El atractivo del modelo del vidrio no se limita a su capacidad para incorporar el desorden. Ciertas aleaciones cristalinas contienen agregados atómicos de simetría icosaédrica, que son bloques de construcción plausibles para el modelo del vidrio. El tamaño de los agregados cae dentro del 1 por ciento del que se requiere para que se den los diagramas de difracción experimentales.

Por el tiempo en que estas ideas iban madurando, a finales de los ochenta, los expertos en materiales y los químicos se afanaban en sus laboratorios a la búsqueda de nuevas aleaciones icosaédricas, que se descubrieron por docenas. Algunos de los materiales eran variaciones de las aleaciones de aluminio-manganeso, pero se sintetizaron también nuevas familias, tales como aluminio-zinc-

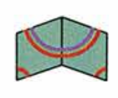
Cómo promover el crecimiento de un mosaico de Penrose

Se puede construir un mosaico de Penrose partiendo de dos tipos de rombos, decorados con bandas de color.



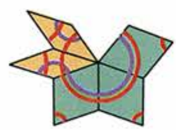

Para generar un mosaico de Penrose, se acoplan los rombos de acuerdo con las siguientes reglas de ajuste: sólo se pueden juntar arista con arista dos teselas rómbicas si coinciden de manera continua las bandas del mismo color a lo largo de la interfase.






Para promover el desarrollo de un mosaico de Penrose, se parte de una tesela simple y se van añadiendo las nuevas al borde exterior. Una vez colocada, no puede quitarse ni cambiarse la tesela. (Este proceso de crecimiento se parece al de la formación de cristales: grupos de átomos se adhieren a la superficie de un cristal "semilla".)

El crecimiento de un mosaico es complicado: una misma posición de la frontera puede acomodar cualquiera de los dos tipos de teselas. Por ejemplo, se podrían ajustar un rombo grueso o dos finos en el espacio superior de estas cinco teselas.

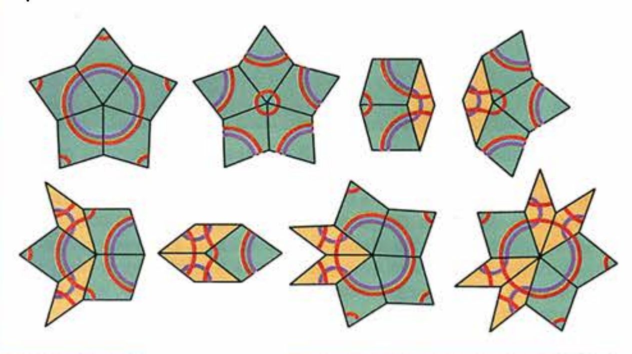


Cuando se presentan estas situaciones, se puede escoger al azar entre las posibilidades. Elecciones que pueden comportar otros problemas. Se pueden emsamblar las teselas rómbicas de manera que obedezcan a las reglas de ajuste y, sin embargo, impedir que otras teselas se añadan al borde. (Abajo: ningún rombo grueso ni ningún rombo fino puede ajustarse al espacio de la izquierda.)



En general, si se realiza una elección equivocada, la teselación dejará de crecer. ¿Hay algún procedimiento que permita el crecimiento ilimitado de los mosaicos de Penrose? Siguiendo el trabajo de John H. Conway y Nicolaas G. deBruijn, George Onoda y sus colaboradores, de IBM, han dado los primeros pasos hacia la solución del problema.

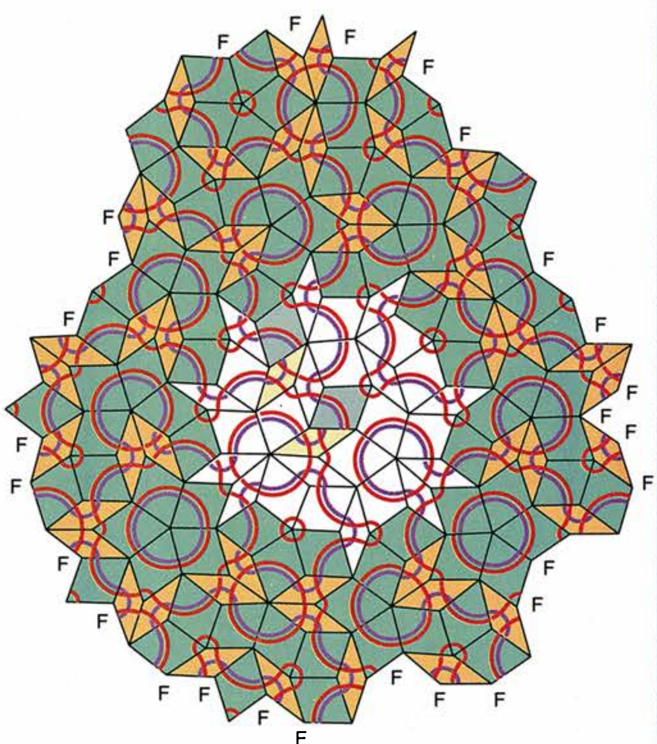
Para entender su método, conviene empezar por advertir que cada vértice de un mosaico de Penrose infinito está rodeado por una de las ocho combinaciones de teselas que se muestran a continuación.



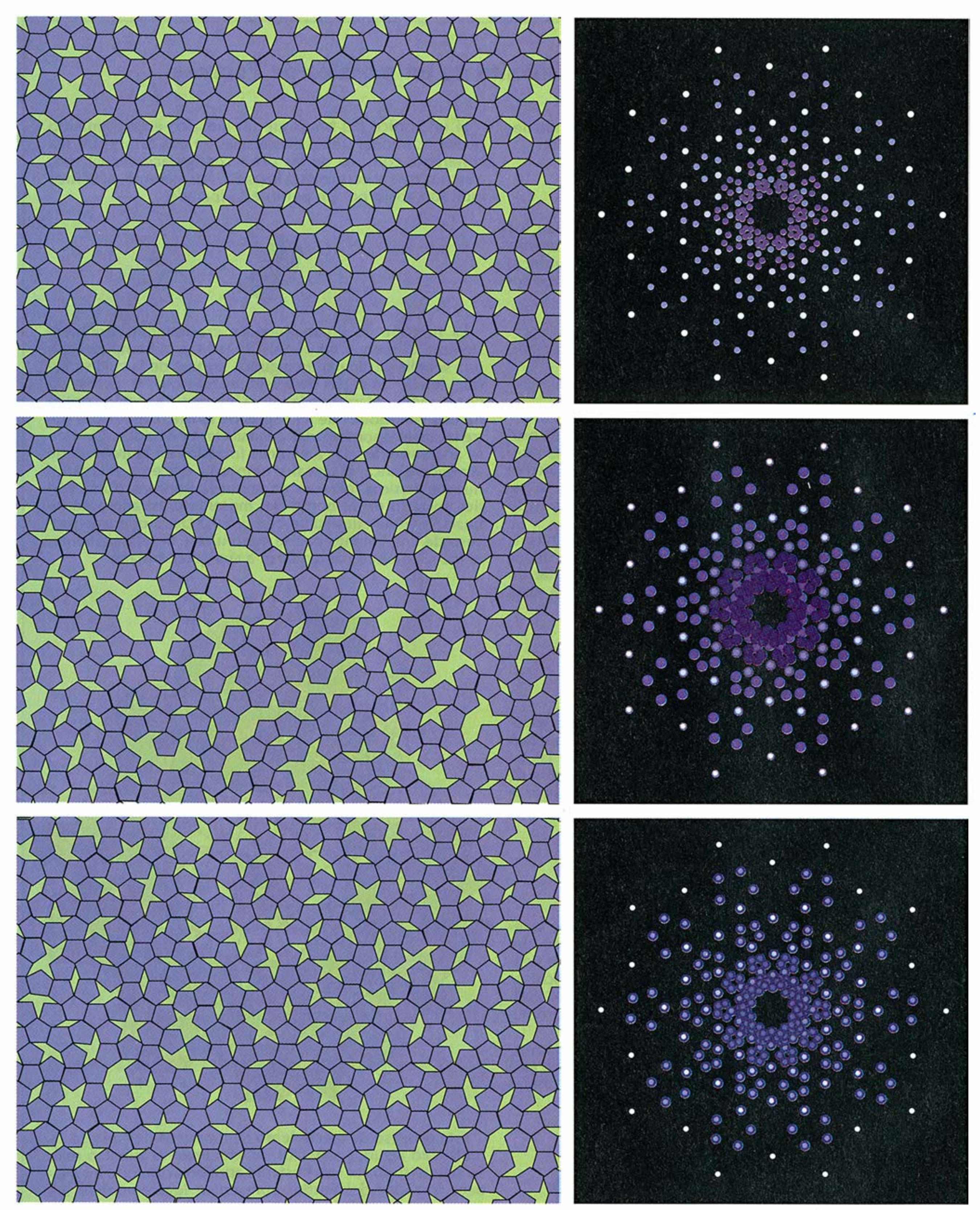
Si un vértice del borde de un mosaico en crecimiento puede acomodar una o más teselas en una forma que sea coherente con una de las ocho configuraciones citadas, diremos que el vértice está forzado. Por ejemplo, el vértice indicado abajo por un punto está forzado.



La frontera de un mosaico en crecimiento contendrá siempre al menos un vértice forzado, si se empieza con una semilla particular en algunos lugares de la cual se hayan violado las reglas de ajuste. Semilla que se representa por la región blanca de la figura inferior. La región contiene dos violaciones de las reglas de ajuste, producidas entre las teselas sombreadas en azul claro y amarillo. Cuando se añadieron teselas a vértices forzados en la frontera de la región blanca, el mosaico empezó a crecer, y se crearon nuevos vértices forzados en la nueva frontera. (Cada vértice forzado en el borde del mosaico mostrado a continuación viene etiquetado con una *F*.) Dado que este proceso de crecimiento puede continuarse indefinidamente, el mosaico puede agrandarse a cualquier tamaño.



Este proceso de crecimiento de mosaicos de Penrose simula sólo algunos aspectos del crecimiento atómico real. Se puede suponer con bastante aproximación que los vértices forzados del borde representan lugares donde los átomos se unen fácilmente a una superficie. Por otra parte, parece poco razonable que algunos vértices puedan esperar durante un tiempo indefinido hasta que se conviertan en forzados. Parece también extraño que, aunque deben ocurrir conjuntamente varias violaciones de las reglas de ajuste para producir una semilla apropiada, deben evitarse errores adicionales. Quizá la investigación ulterior resuelva estas cuestiones.



4. SE HAN PROPUESTO TRES MODELOS para explicar la estructura de los cuasicristales y sus diagramas de difracción. El modelo llamado de Penrose está representado por la red cuasiperiódica en la parte superior izquierda. La red se teje con pentágonos, diamantes, estrellas y "barquitos", ensamblados de acuerdo con unas reglas de ajuste específicas. El modelo del vidrio produce la estructura de la parte central izquierda; la estructura está constituida por pentágonos que han sido pegados, lado con lado, al azar. El tercer modelo, de las teselaciones aleatorias representado en la parte inferior izquierda, es similar al modelo de Penrose, pero contiene irregularidades que están prohibidas por las reglas de ajuste del modelo de Penrose. Para cada una de estas estructuras, pueden calcularse los diagramas de difracción (*diagrama de la derecha*), comparándolos luego con los resultados experimentales. Los modelos de Penrose y de las teselaciones aleatorias producen picos de difracción nítidos, pero los picos de difracción del modelo de las teselaciones aleatorias (*abajo, a la derecha*) están rodeados de halos tenues.

magnesio, uranio-paladio-silicio y níquel-titanio.

Entre los resultados obtenidos de estos nuevos materiales destaca el descubrimiento de la estabilidad termodinámica de las fases cuasicristalinas. El proceso de enfriamiento utilizado por Shechtman y otros producía fases cuasicristalinas de grano muy pequeño, que, al calentarse, se transformaban irreversiblemente en fases cristalinas comunes. Por desgracia, esa metaestabilidad impidió que los investigadores mejoraran la calidad de las muestras por tratamiento térmico y otras técnicas metalúrgicas. De ahí que el primer cuasicristal tuviera tamaños de grano de escasas milésimas de milímetro, imposibilitando muchos tipos de experimentos.

Pero, a lo largo de los últimos años, se han descubierto bastantes materiales que retenían su estructura cuasicristalina hasta la fusión. En consecuencia, se pudieron preparar muestras mucho mayores mediante las técnicas habituales de crecimiento cristalino. Y en ese orden se han obtenido recientemente aleaciones con monogranos que alcanzan los 10 milímetros de tamaño.

Para sorpresa del investigador, cuando se promovió el crecimiento de estos primeros cuasicristales estables de aluminio, litio y cobre, y se hizo con la lentitud requerida para crear superficies de grandes caras, todavía experimentaron el mismo grado de desorden de fasón que sus primos obtenidos por enfriamiento. El descubrimiento del desorden de fasón en estos materiales parecía apoyar el modelo del vidrio icosaédrico.

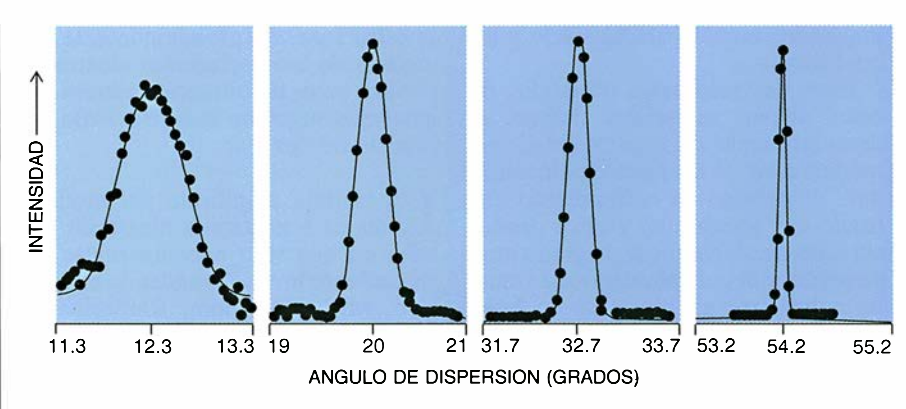
Aunque el modelo del vidrio icosaédrico predice mejor los diagramas de difracción, va demasiado lejos en su intento de incorporar el desorden. Deja demasiados huecos o fracturas en la estructura, donde los agregados icosaédricos no pueden ajustarse; fracturas que no hay en el modelo de Penrose. El efecto neto de las mismas se resume en que el modelo del vidrio sobreestima el grado de ensanchamiento de los diagramas de difracción.

Mientras quienes proponían los modelos de Penrose y del vidrio debatían la importancia del crecimiento local y del desorden de fasón, un tercer grupo de investigadores ideaba el modelo de las teselaciones aleatorias, que combinaba algunos de los mejores conceptos de los modelos de Penrose y del vidrio icosaédrico. Este tercer modelo sugiere que las reglas de ajuste estrictas del modelo de Penrose no deben obedecerse a pies juntillas, ya que no existen huecos en la estructura. Sorprendentemente, el modelo de las teselaciones aleatorias predice picos de difracción nítidos, al igual que su primo más ordenado, el modelo de Penrose.

La ventaja manifiesta del modelo de las teselaciones aleatorias estriba en que sólo necesita reglas de crecimiento local. Abundando en esta idea, Michael Widom, Katherine J. Strandburg y Robert H. Swendsen, de la Universidad de Carnegie-Mellon, demostraron que podían simular el crecimiento de esos mosaicos llenos de defectos mediante la aplicación de los mismos algoritmos de computación utilizados para simular el crecimiento de cristales periódicos. Más aún. Descubrieron que, en determinadas circunstancias, el mosaico lleno de defectos poseía mayor estabilidad termodinámica que el cristal normal. Estos investigadores y Christopher L. Henley, de la Universidad de Boston, demostraron que el desorden asociado a los errores en una estructura cuasiperiódica perfecta podía estabilizar realmente el orden cuasicristalino, al menos con respecto a alguna fase cristalina concurrente. La importancia relativa del desorden crece con la temperatura; por consiguiente, el modelo de las teselaciones aleatorias predice que los cuasicristales alcanzan la fase estable de equilibrio sólo a temperaturas elevadas.

A lo largo de los últimos años, los tres modelos en liza se han ido refinando para acercarse más a los resultados experimentales; en particular, en lo que se refiere a los datos de difracción. Con ese fin se han introducido mecanismos para producir desorden en las estructuras cuasiperiódicas ideales que reproducen con mayor aproximación el ensanchamiento de los picos de difracción. Se han desarrollado algoritmos para promover el crecimiento de mosaicos de Penrose casi perfectos, por medio de reglas que parecen más plausiblemente locales. Por esas fechas, Veit Elser, a la sazón en los laboratorios Bell de AT&T, modificó el modelo del vidrio incorporando movimientos atómicos más realistas durante el crecimiento simulado de un grano cuasicristalino; observó que los diagramas de difracción calculados en tal grano no mostraban un ensanchamiento de picos excesivo, que fuera más allá de los resultados experimentales. Todos estos modelos convergían hacia un punto medio incorporando algún grado de desorden de fasón. Había quien creía ya que las diferencias entre modelos se iba ciñendo a la pura semántica.

Así las cosas, una serie de experi-



5. PROPIEDADES DE DIFRACCION de un cuasicristal formado por aluminio, cobre y litio; se descubrieron bombardeando el cuasicristal con haces de rayos X y midiendo la intensidad de los rayos X dispersados para varios ángulos relativos al del haz. El gráfico muestra que los picos de difracción se agudizan al aumentar el ángulo. Esta agudización es la prueba del desorden de fasón, un tipo de defecto estructural encontrado sólo en los cuasicristales. Las medidas fueron tomadas por Paul Heiney, Paul Horn, Frank Gayle y sus colaboradores, adscritos a la Fuente Nacional de Luz de Sincrotrón, centro de investigación estadounidense.

mentos realizados en 1989 redujeron a dos el número de modelos plausibles: el de Penrose y el de las teselaciones aleatorias. Físicos de la Universidad japonesa de Tohoku descubrieron una nueva familia de aleaciones icosaédricas, que incluían aluminio-cobre-hierro y aluminio-cobre-rutenio. Y cuando nosotros abordamos los diagramas de difracción de rayos X de estos materiales, nos encontramos con la sorpresa de que faltaba el ensanchamiento de picos asociado con el desorden de fasón —un efecto evidente en todas las aleaciones icosaédricas estudiadas previamente—. Peter Bancel, del Centro de Investigación Thomas J. Watson, de IBM, llegó por su cuenta a los mismos resultados, y mostró que, cuando calentaba y enfriaba la aleación de hierro, podía dilatar o restringir el ensanchamiento de pico de fasón.

¿Está el orden cuasicristalino producido por las reglas de ajuste del modelo de Penrose o por la libertad para distribuir grupos locales de átomos que permitan un desorden de fasón limitado? En su empeño por resolver el dilema, varios laboratorios, incluido el nuestro, prosiguen con experimentos para estudiar las condiciones que controlan la perfección de los cuasicristales.

Mientras unos han venido dedicándose a las nuevas formas de orden atómico mostradas por estos materiales, otros han prestado su atención al ámbito de las aplicaciones. Yi He, S. Joseph Poon y Gary J. Shiflet, de la Universidad de Virginia, se apoyaron en las nuevas hipótesis sobre la estructura cuasicristalina para sintetizar vidrios metálicos que contenían por encima del 90 por ciento de aluminio. Confían en sacarle partido a la baja densidad y la insólita dureza de estos materiales. Jean-Marie Dubois y sus colaboradores, de la Escuela Nacional de Ingenieros de Minas de Nancy, han descubierto que ciertos cuasicristales producen excelentes recubrimientos de baja fricción.

Los cuasicristales continúan lanzando guantes de desafío a los físicos expertos en materia condensada. Las ideas que hemos venido enhebrando para desentrañar las propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas de los sólidos cristalinos se apoyan en el bastidor restringido de la periodicidad. Situados ahora ante las estructuras cuasiperiódicas, se nos impone perseguir niveles más elevados de conocimiento.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ICOSAHEDRAL CRYSTALS: WHERE ARE THE ATOMS? Per Bak en *Physical Review Letters*, vol. 56, n.° 8, págs. 861-864; 24 de febrero de 1986.

QUASICRYSTAL EQUILIBRIUM STATE. Michael Widom, Katherine J. Strandburg y Robert H. Swendsen en *Physical Review Letters*, vol. 58, n.° 7, págs. 706-709; 16 de febrero de 1987.

INTRODUCTION TO QUASICRYSTALS. Dirigido por Marko V. Jarić. Academic Press, 1988.

Al-Cu-Ru: AN ICOSAHEDRAL ALLOY WITHOUT PHASON DISORDER. C. A. Guryan, A. I. Goldman, P. W. Stephens, K. Hiraga, A. P. Tsai, A. Inoue y T. Masumoto en *Physical Review Letters*, vol. 62, n.° 20, págs. 2409-2412; 15 de mayo de 1989.

DYNAMICAL PHASON IN A PERFECT QUASICRYSTAL. Peter A. Bancel en *Physical Review Letters*, vol. 63, n.° 25, págs. 2741-2744; 18 de diciembre de 1989.

EXTENDED ICOSAHEDRAL STRUCTURES. Dirigido por Marko V. Jarić y Dennis Gratias. Academic Press, 1989.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Cremalleras moleculares y regulación génica

Copias sucesivas del aminoácido leucina en las proteínas sirven de dientes donde "encastrar" dos moléculas proteicas juntas, acoplamiento éste que participa en la activación y desactivación de los genes

Steven Lanier McKnight

A imagen, diríase, de los científicos, las células del hombre y de otros organismos multicelulares tienden a especializarse. Considérense, por ejemplo, las células de la dermis y el hígado. Los queratinocitos forman una barrera de protección entre un animal y su entorno. Esas células de la piel difieren por completo de los hepatocitos, células del hígado que almacenan glucógeno (una fuente de energía), eliminan toxinas de la sangre y secretan muchos constituyentes del suero sanguíneo, incluida la albúmina. La cuestión de cómo aparecen esas divergencias ha supuesto un reto para los biólogos de buena parte de nuestro siglo.

Podríamos salir del paso con una respuesta un tanto superficial: las propiedades distintivas de las células derivan de las proteínas especializadas que sintetizan, en contraposición a las proteínas "comunes" presentes en todas las células. Abundando en ello, los queratinocitos logran su resistencia gracias a las queratinas, proteínas fibrosas que tienden cables largos y entrelazados; los hepatocitos almacenan glucógeno merced a su propia síntesis de enzimas hepáticas que cumplen esa labor.

Bajemos un peldaño más. Podríamos entonces añadir que, habida cuenta de que las instrucciones para proceder a la síntesis de proteínas se hallan en los genes, las propiedades que definen a una célula vienen determinadas por la mezcla de genes activos. (Cada gen, constituido por ADN, codifica una proteína.)

Aunque más precisa, tampoco esta respuesta resuelve la cuestión. No nos aclara por qué ciertos genes se muestran activos en una célula y no en otra. Virtualmente todas las células de un organismo poseen idénticos genes. Sin embargo, sólo los queratinocitos expresan con abundancia los genes de la queratina; en esas células se transcriben los genes determinantes de queratinas en moldes de ARN mensajero que, a su vez, se traducen en las propias queratinas. Y lo propio cabe afirmar de los hepatocitos y su expresión del gen de la albúmina.

El problema de la expresión diferencial génica continúa, pues, planteado. Cierto es que va cediendo poco a poco, a medida que progresa la investigación; y otro tanto sucede con la cuestión más general relativa a la activación y desactivación de un gen cualquiera. He contribuido, con mis colaboradores de la Institución Carnegie de Washington, al descubrimiento fundamental, realizado por otros investigadores, de que el control de la expresión génica corresponde, en medida muy destacada, a las proteínas que se unen al ADN.

Hemos demostrado que muchas de estas proteínas reguladoras de los genes se "encastran" por parejas. Semejante acoplamiento resulta crucial a la hora de poder unirse al ADN; lo parece así también para controlar la actividad génica por otros medios y para participar en la decisión de activar un gen en una célula y no en otra. Los "dientes" que engarzan las moléculas están constituidos, casi siempre, por el aminoácido leucina; por eso convenimos en denominar cremallera de leucina a la región dentada.

Descubrimos la cremallera de leucina en 1987, mientras nos esforzábamos por conocer mejor de qué modo las proteínas entrelazadas con el ADN activaban los genes. Acababan de identificarse las primeras proteínas de ésas. Algo se sabía de su funcionamiento, pero la investigación había quedado estancada. Veamos cómo estaban las cosas entonces y así entenderemos mejor la situación actual.

El descubrimiento de las proteínas reguladoras de genes vino favorecido por el impulso que recibió la investigación relativa a la estructura del ADN y, más tarde, el estudio de la organización génica. En 1980 los científicos llevaban más de 25 años sabiendo que el ADN era una doble hélice compuesta de dos hebras de nucleótidos (los sillares del ADN). Los nucleótidos constan de un azúcar, un fosfato y un grupo químico denominado base, ya sea adenina (*A*), citosina (*C*), guanina (*G*) o timina (*T*). Las dos hebras de ADN están unidas por las bases; los nucleótidos así apareados forman los pares de bases. La adenina de una hebra se empareja siempre con la timina de la hebra complementaria; la citosina lo hace con la guanina.

Había quedado también establecido que los genes incluían dos cosas: un elemento codificador de proteínas y elementos reguladores. Los pares de bases del elemento codificador especifican los aminoácidos que deben engarzarse en una cadena proteica —el producto génico—. Los elementos reguladores controlaban la transcripción del segmento codificador. El trabajo subsiguiente, realizado pri-

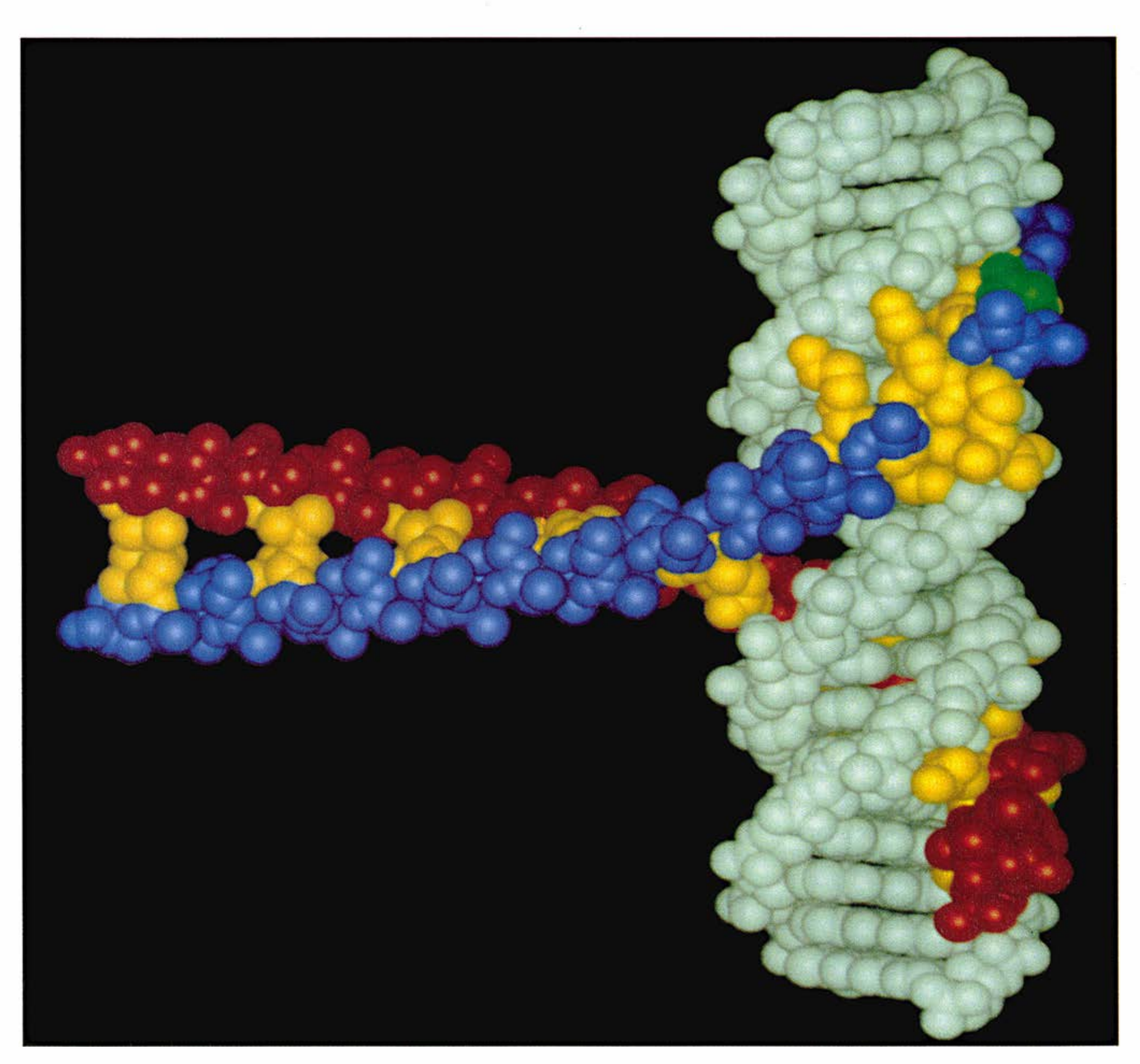
STEVEN LANIER McKNIGHT trabaja en el departamento de embriología de la Institución Carnegie de Washington en Baltimore, labor que compagina con la de investigador del Instituto Howard Hughes. Se doctoró en biología por la Universidad de Virginia en 1977. Desde entonces ha estado vinculado a la Carnegie, salvo el trienio (de 1981 a 1984) que pasó en el Centro de Oncología Fred Hutchinson en Seattle.

mero con bacterias y luego en organismos multicelulares, permitió determinar que el promotor, un elemento regulador, aparecía adyacente a la región codificadora. El promotor dicta en qué lugar de la molécula de ADN la enzima ARN polimerasa deberá iniciar la transcripción; el promotor condiciona, asimismo, el régimen de transcripción.

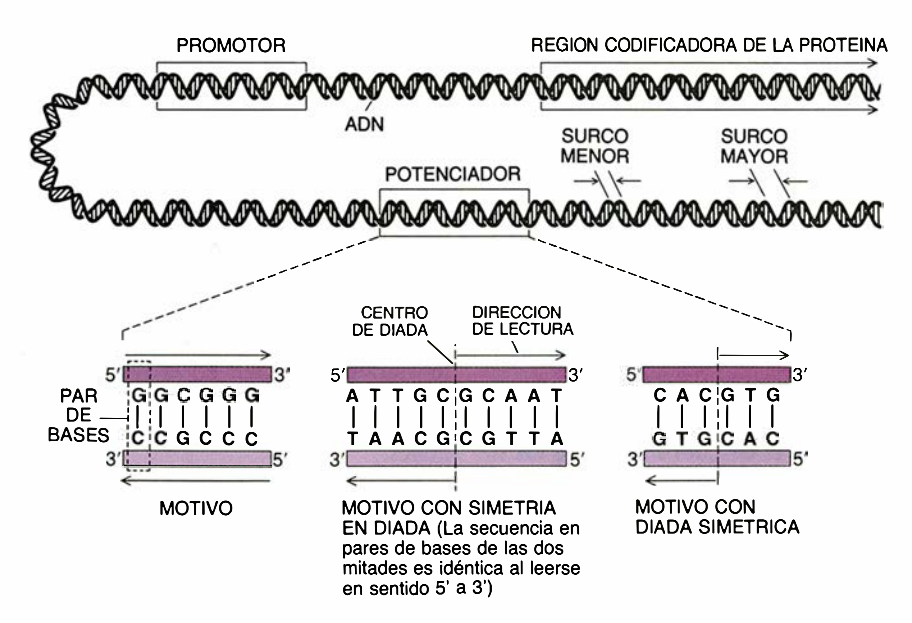
A lo largo de los años ochenta, los estudios sobre virus sacaron a la luz otros elementos reguladores: los potenciadores (o intensificadores). El potenciador puede hallarse a miles de pares de bases de distancia del elemento codificador que controla. En otros aspectos, sin embargo, los potenciadores se parecen bastante a los promotores. Igual que éstos, por ejemplo, refuerzan el régimen de la transcripción. La verdad es que operan de forma concertada. Intensificadores y promotores pueden consistir en varios centenares de pares de bases agrupados en motivos: secuencias específicas de seis a diez pares de bases. Un potenciador o promotor convencional podría contener de cinco a diez motivos, algunos de ellos repetidos.

Llegados a este punto, conviene señalar el descubrimiento de los silenciadores, elementos reguladores que reprimen la expresión de los genes. Alexander D. Johnson, de la Universidad de California en San Francisco, demostró en un trabajo impecable que los silenciadores, lo mismo que los potenciadores, podían ejercer su acción génica desde grandes distancias del elemento codificador y constituyen un conjunto de motivos de ADN. Cabe presumir que se hallan sujetos a un control semejante al que rige sobre los potenciadores. Sin menospreciar el interés que los silenciadores revisten en la regulación génica, me limitaré aquí a los elementos que gobiernan la activación de los genes.

Por las fechas en que comenzaron a identificarse promotores y potencia-



1. ENCASTRE entre dos proteínas (*izquierda*) mediante la interacción de sus leucinas (*bolas amarillas*); ese acoplamiento facilita el anclaje de ciertas proteínas en la molécula de ADN (*blanco*) y, así, activar o silenciar genes. Las bolas amarillas que están en contacto con el ADN (*derecha*) no representan leucinas, sino aminoácidos dotados de carga positiva que confieren firmeza al asimiento de las proteínas. El grupo en verde simboliza la asparagina; gracias a este aminoácido, los segmentos proteicos enlazantes del ADN, que recorren el surco mayor, se enroscan en torno al ácido nucleico.



2. UN GEN TIPICO abarca una región codificadora de proteínas y dos elementos, llamados promotor y potenciador, que regulan la transcripción génica: proceso en virtud del cual se copia la región codificadora en ARN mensajero para su traducción en una proteína específica. Los promotores y los potenciadores poseen varios motivos, agrupaciones de nucleótidos (los sillares del ADN) donde se engarzan las proteínas. Los nucleótidos se distinguen en razón de sus bases: adenina (*A*), citosina (*C*), guanina (*G*) o timina (*T*). Las proteínas encastradas suelen unirse a motivos con simetría en díada, que poseen mitades idénticas; en un par, cada proteína se acopla a una de las dos mitades.

dores, se ignoraba bastante su modo de operación. Sería hacia 1984 cuando Robert Tjian y su equipo de la Universidad de California en Berkeley se encontraron con un hallazgo fundamental. Vieron que un motivo que se repetía cinco veces en el promotor del gen *precoz* del virus de mamífero SV40 era objeto de ávido enlace por parte de la proteína SP1. Es más, después de dicha trabazón, se activaba de forma selectiva la transcripción del gen *precoz*. Tratábase de la primera demostración, bacterias al margen, de que los elementos reguladores de los genes podían estar controlados por proteínas unidas a ellos. La lista de tales proteínas reguladoras, en número muy alto entre los organismos multicelulares, continúa creciendo.

El descubrimiento de Tjian dio pie a un modelo plausible de activación génica. A este respecto, cada motivo de promotor o potenciador representaba un lugar de unión para una proteína reguladora. El gen se expresaría de forma significativa en el caso exclusivo de que cada motivo de su promotor y potenciador apareciese enlazado. Por consiguiente, la expresión de un gen particular estaría limitada a las células capaces de sintetizar el conjunto completo de proteínas reguladoras que se precisara para reconocer cada motivo.

La predicción de que los motivos individuales constituían lugares de unión para proteínas reguladoras resultó ser correcta; lo fue también la noción de que debía ocuparse cada motivo para que se desarrollara la regulación cabal del gen. Con todo, en un sorprendente giro de los acontecimientos, descubría con mis colaboradores que, no obstante ser los hepatocitos las únicas células que sintetizan albúmina, las células cerebrales y el páncreas también contenían proteínas capaces de distinguir los elementos reguladores conocidos del gen de la albúmina.

Observación ésta que, sumada a otras semejantes realizadas por otros, sugería que las fases implicadas en la conmutación de un gen eran más complejas de lo previsto en un comienzo. El reconocimiento, por las proteínas, de cada motivo regulador de un gen no podía explicar ese proceso. Para conocer mejor el modo de operar de promotores y potenciadores, había que profundizar en las proteínas que se unen al ADN.

En esa labor estábamos empeñados muchos. Nuestro equipo decidió concentrarse en una proteína que reconoce un motivo llamado CAT (abreviatura de CCAAT) presente en muchos promotores, lo mismo en genes de virus que de mamíferos. Una vez aislada una pequeña cantidad de la proteína, nos propusimos encontrar un anticuerpo contra ella. El anticuerpo serviría de trazador y nos permitiría delimitar cuándo y en qué zona del organismo del mamífero operaba la proteína.

Por medios más alambicados, el anticuerpo habría de ayudarnos también a clonar el gen codificador de la proteína, es decir, a aislarlo y sintetizar su producto en copiosa cuantía. Conseguido ello, podríamos entonces abordar el estudio minucioso de la proteína reguladora y, a la vez, recabar información sobre la parte que le cabe en la activación de otros genes. Podríamos establecer su secuencia aminoacídica completa y, quizá, acercarnos a su estructura tridimensional, la mecánica de su unión con el ADN y la naturaleza de sus interacciones con otras proteínas reguladoras.

El plan era impecable, pero de ejecución difícil. Peter F. Johnson, Barbara J. Graves, William H. Landschulz y yo invertimos nada menos que tres años en purificar la proteína y producir un anticuerpo contra un pequeño fragmento de la misma. Una vez purificada, descubrimos que no limitaba su afinidad al motivo CAT de los promotores, sino que la mostraba también hacia la homología de núcleo, motivo común a muchos potenciadores. Por esa razón dimos en llamar C/PEP a esa substancia. (Abrevia la expresión CAT/Proteína Enlazante de Potenciador; en inglés, C/EBP.)

Mediante el concurso del anticuerpo descubrimos que nuestra proteína no la sintetizaban todos los tejidos. Abundaba en el hígado, pulmones, intestino delgado y tejido placentario, así como en la grasa, pero no se la apreciaba en la mayoría de los restantes tejidos de mamífero adulto. Allí donde se encontrase, se limitaba a las células especializadas que definían las propiedades fisiológicas de los tejidos. Por ejemplo, la C/PEP se sintetizaba en los hepatocitos, pero no la producían las células que conformaban el conducto secretor del hígado.

Esta última observación abonaba la posibilidad de la participación de la C/PEP en la expresión génica selectiva, colaborando en la activación de los genes de las proteínas especializadas (como la albúmina) que señalaban las diferencias entre las células. No tardamos en confirmar que la C/PEP contribuía a la producción de proteínas en los hepatocitos y en las células del tejido adiposo. Habíamos conseguido aislar justamente el tipo de proteína imprescindible para conocer el proceso de regulación, en los mamíferos, de la expresión génica diferencial.

Tan pronto hubimos clonado el gen de la C/PEP y establecido su secuencia nucleotídica completa, elucidado por tanto la identidad y orden de los 359 aminoácidos de la proteína, inmediatamente introdujimos la secuencia de aminoácidos en un banco de datos de ordenador para comprobar si se parecía a cualquier proteína conocida. El hallazgo de secuencias similares en regiones de otras proteínas nos revelaría las partes que, en potencia, revestirían interés para la función de la C/PEP. Suele ocurrir que, cuando tramos específicos de aminoácidos desempeñan funciones cruciales, se mantienen por lo común a lo largo de la evolución, y así torna a aparecer ese segmento en macromoléculas que cumplen misiones afines, ya sea en una misma especie o en especies distintas.

El rastreo informático reveló que un segmento de la C/PEP, constituido por 60 aminoácidos, guardaba un estrecho parecido con segmentos de otras dos proteínas: los productos de los proto-oncogenes *myc* y *fos*. (Los proto-oncogenes son genes que funcionan con normalidad en el organismo y se convierten en cancerígenos al sufrir ciertas mutaciones.) En el caso de la C/PEP se sabía que una porción de segmento participaba en la unión con el ADN. Se desconocía en qué consistía la actividad normal de las proteínas Myc y Fos, pero el hecho de que una parte de ellas se asemejase a la región de unión de la C/PEP al ADN sugirió que podría tratarse de proteínas reguladoras de genes. Sospecha que confirmarían más tarde otros investigadores: Myc y Fos eran proteínas reguladoras.

Por nuestra parte, nos entregamos a la arquitectura de regiones afines de la proteína. La estructura tridimensional de una proteína, que viene determinada por su secuencia aminoacídica, condiciona su forma de relacionarse con otras moléculas. No hay, por desgracia, reglas infalibles para predecir la configuración de una proteína a partir de su secuencia aminoacídica lineal; hubo, pues, que recurrir a ciertos tanteos.

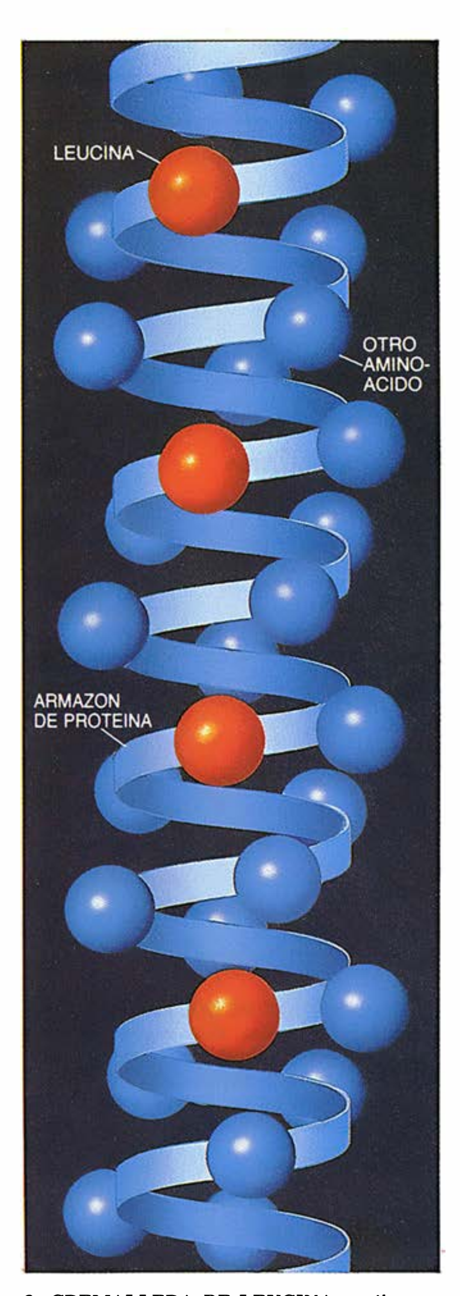
En parte, lo sabíamos, muchas proteínas adoptan al plegarse la forma de una hélice alfa. Como un carrete. Comenzamos, pues, por examinar si los segmentos que emparentaban C/PEP, Fos y Myc adoptarían tal estructura. De contener dichas regiones prolina o glicina, hubiese sido improbable una hélice alfa, pues son aminoácidos que no suelen aparecer en esa forma geométrica. Lo cierto es que no había ni prolinas ni glicinas.

En la superficie de las hélices alfa se encuentran a menudo aminoácidos con propiedades químicas distintas, característica que recibe el nombre de anfipatía. Por ejemplo, una hélice puede presentar aminoácidos hidrófobos (repelentes de agua) en un costado y versiones hidrófilas (atrayentes de agua) en la cara opuesta. Cualquier indicio de anfipatía favorecería nuestra hipótesis sobre la helicidad; ni corto ni perezoso, Landschulz examinó un segmento de 35 aminoácidos de la C/PEP para comprobar si se mostraba anfipático al moldearlo en hélice alfa. Ni que decir tiene que los aminoácidos hidrofóbicos e hidrofílicos se disponían en superficie.

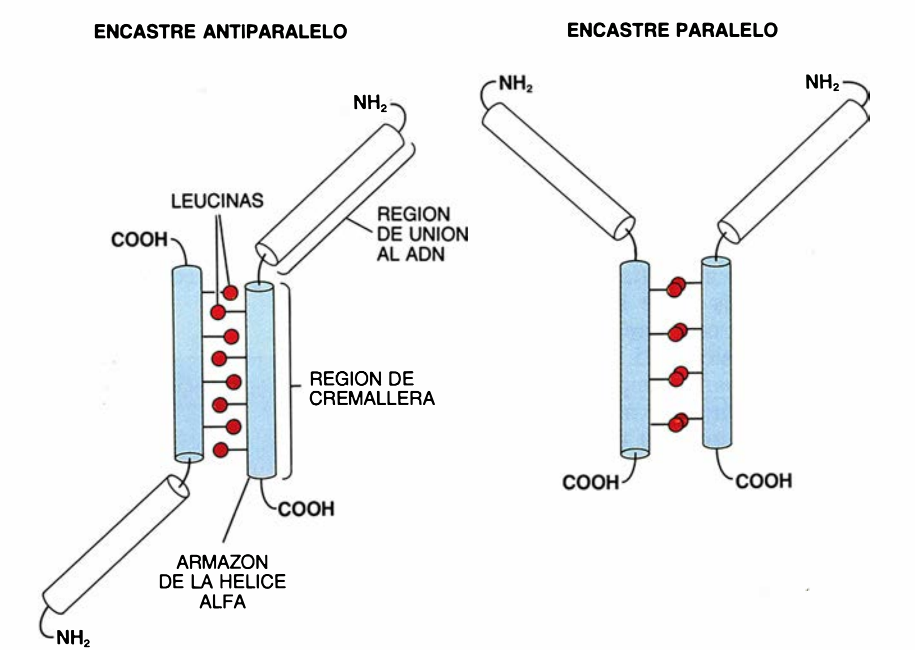
Debido a que los aminoácidos hidrófobos son atraídos por otras substancias que repelen el agua, parecía plausible que la cara hidrofóbica interaccionara con regiones hidrófobas de otras proteínas, mientras que al costado hidrofílico le "apetecería" interaccionar con el agua, el componente mayoritario de las células. Más tarde confirmaríamos que la cara hidrófoba interaccionaba con otras proteínas, aunque lo hacía de una manera peculiar.

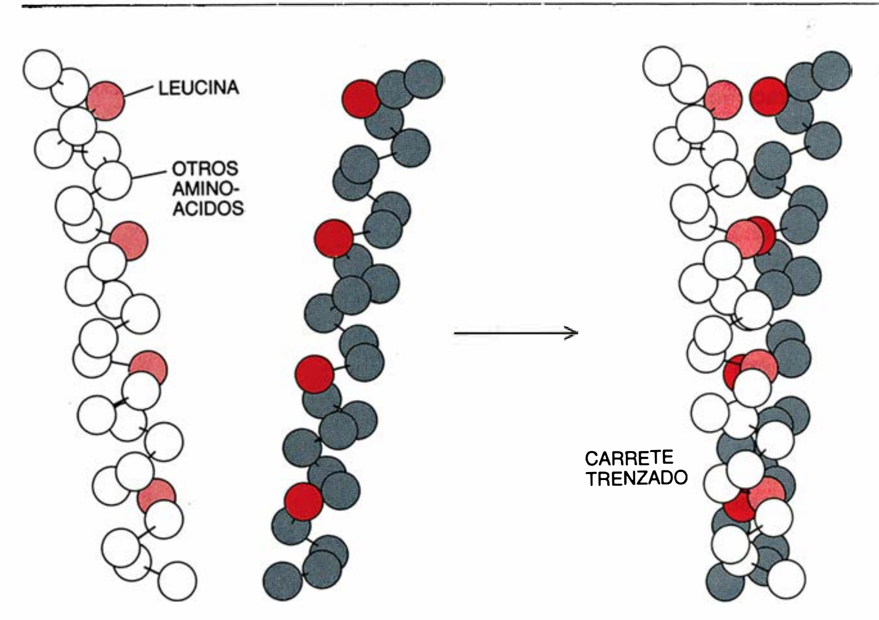
Recuerdo que me hallaba examinando un dibujo a lápiz de la supuesta hélice de la C/PEP que Landschulz había esbozado la misma víspera de la Navidad de 1987. Me sorprendió comprobar que el aminoácido leucina, que se distingue por su intensísima hidrofobia y emerge bastante alejado del armazón de la hélice, ocupaba todas las posiciones múltiplos de siete. Por mor de esa "repetición septenaria", las leucinas se veían forzadas a alinearse en un plano a lo largo de la hélice y constituir una suerte de cordillera.

La distribución ordenada de las leucinas insinuaba que éstas cumplían un objetivo preciso. ¿Participaban acaso en las interacciones hidrofóbicas que hemos comentado? Inspeccioné con Landschulz las proteínas Myc y Fos para comprobar si



3. CREMALLERA DE LEUCINA (*arriba*); **se descubrió mientras se pretendía configurar un breve segmento de la proteína C/PEP en una hipotética hélice alfa, estructura ésta que es común a muchas proteínas. Para sorpresa de los investigadores, las leucinas, que aparecen en cada séptima posición de la cadena aminoacídica, se alinean en columna. Un modelo de ordenador** (*izquierda*) **muestra otra vista de la hélice ideal. Los salientes en rojo son leucinas; las esferas azuladas representan otros aminoácidos.**





4. ARTICULACION DE DOS PROTEINAS en las regiones de cremallera. Costó llegar al conocimiento de ese fenómeno. Si las regiones hubiesen sido antiparalelas, las leucinas se hubieran interdigitado (*arriba, a la izquierda*), como los dientes de una cremallera auténtica; si paralelas, las leucinas contrapuestas se superpondrían (*arriba, a la derecha*). Hoy sabemos que el modelo paralelo es el correcto: coloca las regiones de unión al ADN en la posición idónea para poner en conexión los motivos de simetría en díada. Las proteínas se combinan para formar un carrete trenzado.

éstas exhibían también idéntica distribución, lo que apuntalaría la hipótesis que concedía interés a las repeticiones septenarias. Con satisfacción comprobamos que las regiones de las proteínas Myc y Fos emparentadas con el segmento mencionado de la C/PEP, amén de ser anfipáticas al conformarse en hélice alfa, mostraban la misma repetición septenaria de las leucinas presente en la C/PEP.

Hoy sabemos que semejante cadencia de leucinas en las proteínas reguladoras de genes permite a los polipéptidos trabarse por sus regiones de cremallera y constituir dímeros. Esta noción tardó en consolidarse al depender de varios descubrimientos adicionales.

Recordémoslos. En una observación que habría de condicionar en adelante nuestra visión de las cosas, percibimos que los motivos estructurales enlazados por la C/PEP poseen una simetría en díada, característica muy común en promotores y potenciadores. Portan esos motivos dos mitades idénticas. Mark Ptashne y sus colegas, de la Universidad de Harvard, habían ya demostrado, en bacterias, el engarce de dímeros en los motivos en cuestión, así como la interacción de cada subunidad dimérica con una de las mitades diádicas. Su trabajo nos sugirió que la C/PEP podría combinarse consigo misma para constituir un dímero antes de unirse al ADN.

A nuestro conocimiento llegó la existencia de otras dos proteínas emparentadas con la C/PEP. Una de ellas, la GCN4, era un regulador de genes en levaduras. Y llovía sobre mojado cuando Kevin Struhl y sus colegas, de Harvard, establecieron que el motivo del ADN al que se enlazaba la GCN4 poseía una simetría en díada y que esta proteína se anclaba, en forma dimérica, en el ADN.

La segunda proteína era el producto de un proto-oncogén de nombre *jun*. Había sido identificada por Peter K. Vogt y su equipo, de la Universidad del Sur de California. Tom Curran, adscrito al Instituto Roche de Biología Molecular, había mostrado que la proteína Jun podía combinarse con la proteína Fos para crear entre ambas un dímero. Aquello era provocador: si llegábamos a conocer de qué manera se producía esa combinación, entenderíamos sin duda el comportamiento de las dos proteínas en la célula.

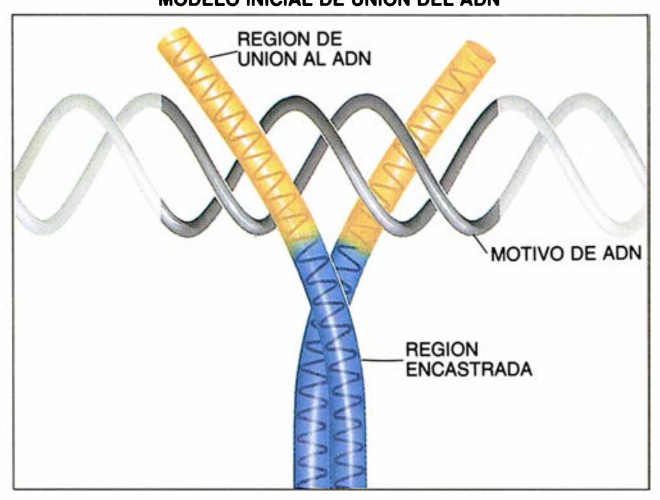
Las regiones de la GCN4 y de la Jun emparentadas con la C/PEP portaban leucinas en cada séptima posición de una hélice alfa ideal. Amasando todas estas observaciones, Landschulz, Johnson y yo mismo propusimos que la función de la hélice alfa anfipática era la de crear una superficie que permitiese a las proteínas combinarse en dímeros y que esta constitución dimérica venía exigida para la unión al ADN. Debido a la fuerte atracción mutua que experimentan las leucinas, postulamos también que la cordillera formada en la proteína por los salientes de ese aminoácido se encastraría con otra sierra similar de otra proteína, a modo de cierre de cremallera.

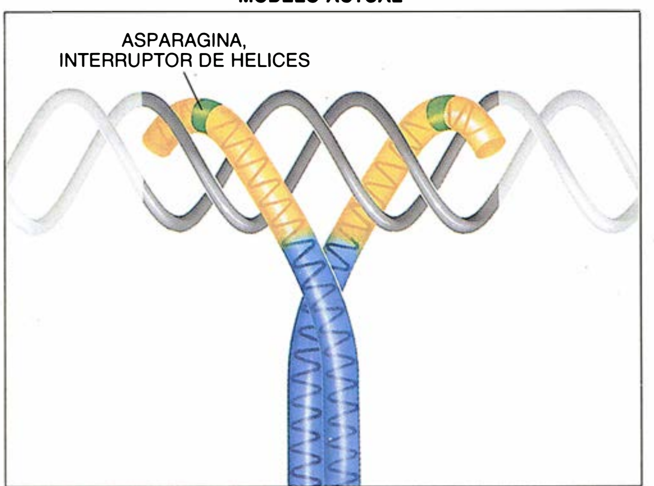
Muchas observaciones han consolidado nuestras hipótesis. Así, por ejemplo, las mutaciones capaces de bloquear la formación de una hélice alfa en la región de engarce impiden el encastre. La constitución de dímeros viene impedida también por mutaciones que sustituyen leucinas por otros aminoácidos que generan atracciones hidrofóbicas más débiles. En particular: todas las mutaciones que impiden la dimerización también bloquean la unión al ADN.

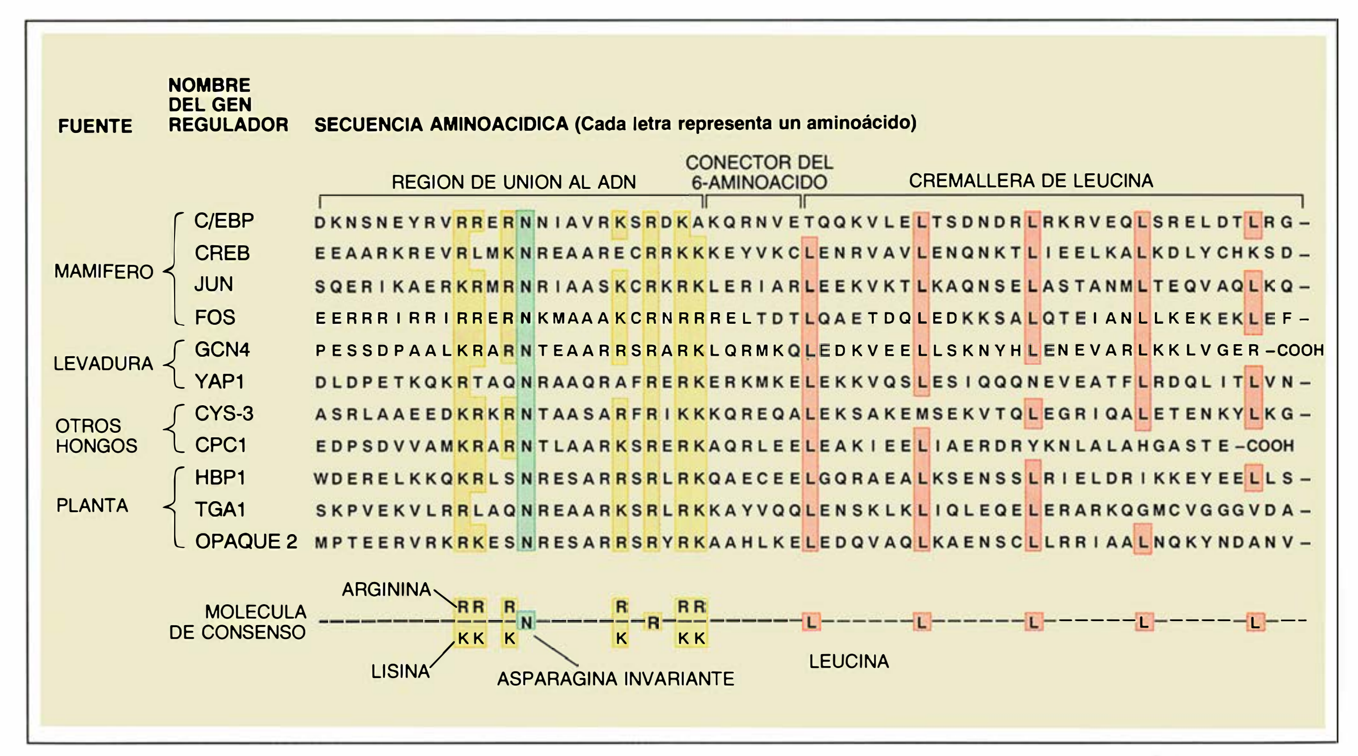
Sospechábamos en un comienzo que las regiones de cremallera podrían, al juntarse, adoptar orientaciones antiparalelas, de suerte que las leucinas encastrasen como auténticos dientes de cremallera. Vinieron luego, sin embargo, Peter S. Kim y Erin K. O'Shea, del centro Whitehead de investigación biomédica del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y aplicaron diversas técnicas de investigación a la molécula de GCN4. De acuerdo con su trabajo, las regiones de cremallera se asocian en paralelo al combinarse. Las leucinas de las moléculas antagónicas no se interdigitan, sino que se alinean de costado.

Kim y O'Shea demostraron, además, que las hélices unidas forman un carrete de hilo clásico, estructura ésta que estamos acostumbrados a ver en los dímeros de muchas proteínas fibrosas largas, incluidas las queratinas y las lamininas que forman la membrana nuclear. Las proteínas fibrosas se encastran a través de aminoácidos hidrofóbicos regularmente espaciados, aunque no exclusivamente dependientes de la leucina, verdadera quintaesencia de aminoácido hidrófobo. De aquí que la cremallera de leucina sea una variación de un tema más amplio; tal vez apareció para asegurar la trabazón de hélices alfa cortas.

En lo que sería otra anticipación, sugerimos que las cremalleras estarían doblemente capacitadas: para acoplar dos proteínas idénticas, constituyendo un homodímero, y para engarzar proteínas dispares (verbigracia, Fos o Jun), creando un hetero-







5. **CREYOSE EN UN COMIENZO que la región de las proteínas de cremallera que se unía al ADN adoptaba la forma de una hélice alfa continua y sobresalía de la molécula del ácido nucleico (*arriba, a la izquierda*). La comparación de las secuencias aminoacídicas de 11 proteínas (*abajo*) reveló que ciertos aminoácidos de la eminencia persistían —se conservaban, como se dice en teoría de la evolución— en las distintas moléculas (*resaltado en amarillo*); ello daba a entender que participaban en la unión y entraban en contacto con el ADN. Además, el aminoácido asparagina (*verde*), un potencial interruptor de hélices, aparecía siempre en un punto fijo de la región de unión al ADN, en cada proteína. Podría facilitar, pues, el plegamiento de la sección protuberante y permitir el contacto continuo con el ADN (*arriba, a la derecha*).**

dímero. La idea de que dos proteínas distintas se encastraran en cremallera constituía el aspecto más novedoso de nuestro modelo; con todo, diversos investigadores actualmente han demostrado su corrección. Entre los pares mixtos conocidos se hallan heterodímeros formados por la combinación de variantes distintas de la proteína C/PEP.

Intuíamos que ese cruce podría tener importancia para la capacidad de un organismo de regular la expresión génica. Con todo, si queríamos comprender mejor el papel específico del cruzamiento, precisábamos averiguar de qué modo la interdigitación favorecía el proceso de unión. Aunque la cremallera de leucina puede generar los dímeros necesarios para la unión al ADN, la región de cremallera por sí misma no puede unirse a esta molécula.

Desde las primeras fases de nuestro trabajo sobre la C/PEP nos dimos cuenta de que, próxima a la cremallera, había una región rica en aminoácidos básicos (cargada positivamente); en particular, arginina y lisina. Debido al carácter acídico (portador de carga negativa) del ADN y a la atracción entre sustancias dotadas de cargas opuestas, postulamos que esta región básica de arg/lys podría ser la parte de la proteína que se hallara en contacto directo con el ADN. Confirmada esa posibilidad, el encastre entre dos moléculas serviría para colocar sus regiones arg/lys en la posición requerida para la combinación de los motivos con simetría en díada.

La investigación reciente ha puesto de manifiesto que la región arg/lys constituye la región de unión al ADN. En este sentido, se han hallado mutaciones en su seno que impiden que los dímeros se combinen de modo eficaz con el ADN. La investigación sobre la estructuración de la región de unión ha respaldado la idea de que el encastre oriente las regiones arg/lys para establecer el contacto adecuado con el ADN.

Buena parte de cuanto hemos llegado a conocer sobre la unión entre proteínas acopladas y ADN procede de la comparación minuciosa de 11 proteínas reguladoras de genes, cada una de las cuales poseía regiones vecinas de encastre y de arg/lys. Proteínas que pertenecen a plantas, hongos o mamíferos —organismos que en algunos casos (particularmente plantas y mamíferos)— divergieron hace más de mil millones de años.

La comparación daba a entender en un comienzo que todas las proteínas estaban diseñadas de suerte tal

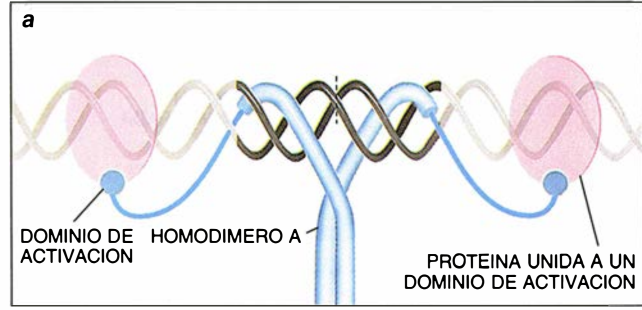
LOS HETERODIMEROS AUMENTAN LA CIFRA DE MOTIVOS UTILES

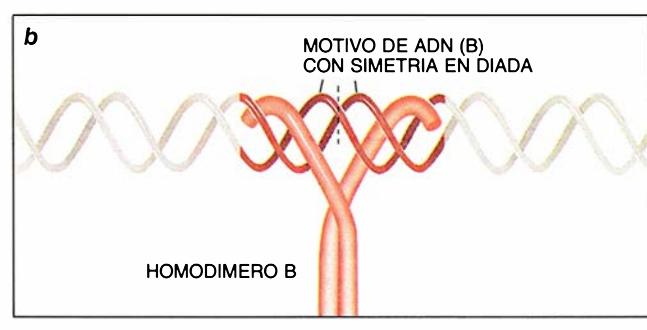
a

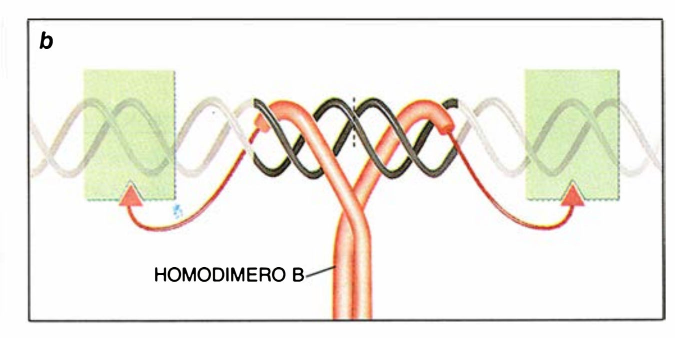
MOTIVO DE ADN (A)
CON SIMETRIA EN DIADA

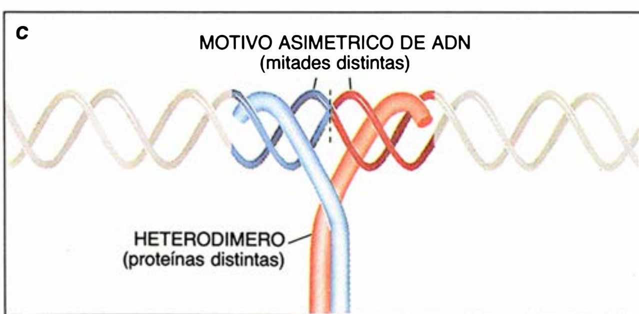
HOMODIMERO A
(proteínas idénticas)

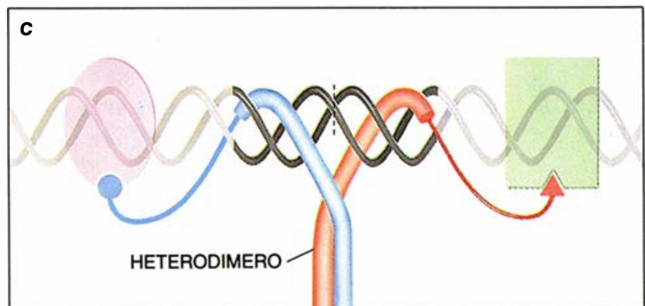












6. LOS HETERODIMEROS, pares encastrados de proteínas distintas, ofrecen dos posibles ventajas a los organismos. Si los homodímeros, pares de proteínas iguales, reconocen sólo motivos con simetría en díada (gemelos) (*a* y *b a la izquierda*), la existencia de heterodímeros capaces de reconocer los asimétricos (desajustados) (*c*) ampliaría la cantidad de motivos a contabilizar en la regulación génica. En opción alternativa, la ventaja podría hallarse en alguna otra parte (*derecha*). La proteína en un homodímero enlazante de "dominios de activación" siempre se combina con proteínas idénticas (*a* y *b*), mientras que los dominios de heterodímeros unen proteínas dispares (*c*). Los heterodímeros podrían aumentar el número de complejos proteicos ordenados que se emplean para activar o desactivar genes.

que, al constituirse el dímero, la macromolécula resultante adoptara forma de Y. La región encastrada ocuparía, por descontado, el eje o tallo y las regiones arg/lys constituirían los brazos de unión al ADN.

Conjeturábamos también que la hélice de la región de encastre se prolongaría rectilíneamente a través de la región de unión al ADN. Nos fundábamos para ello en que los segmentos arg/lys de las 11 proteínas carecían de glicina y prolina, aminoácidos que se oponían a la formación de hélices. Observamos más; en cada proteína, había seis aminoácidos entre la región de encastre y la de unión con el ADN. Si ese segmento conector fuese helicoidal, aseguraría que cualquier aminoácido conservado del área arg/lys cayera en la misma cara en cada molécula, presumiblemente en la cara implicada en la unión con el ADN.

Previmos que cada brazo helicoidal de la Y se combinaría con la mitad de una posición de reconocimiento con simetría en díada, en el ADN. La hélice de ADN posee sus propios surcos, semejantes a los de un tornillo. El surco mayor es ancho; el menor, estrecho. Confiábamos en que un brazo de la Y encajaría en el surco mayor de la cara inmediata del ADN, en contacto con una mitad del motivo, y que el otro brazo se acoplaría con el surco mayor de la cara distante, en conexión con la otra mitad del motivo estructural.

Para establecer la validez de este modelo conceptual, Charles R. Vinson, doctor en prácticas de mi laboratorio, construyó un modelo de palos y bolas emparejando dos moléculas idénticas de C/PEP. Las moléculas se acoplaron suavemente y podían adoptar la forma de una Y.

En el modelo de Vinson las argininas y lisinas conservadas aparecían en el interior de cada brazo de la Y. Esta distribución era coherente con nuestra idea, pues disponía las argininas y las lisinas en una posición apropiada para formar enlaces iónicos con el ADN, con su armazón, negativamente cargado, de azúcares y fosfatos. Este tipo de unión permitiría la permanencia firme de la proteína asida al ADN.

Un segundo hallazgo resultó menos favorecedor para nuestra idea inicial. Vimos que la región arg/lys, en cuanto se configuraba como hélice continua, resultaba demasiado larga para posibilitar el contacto ininterrumpido con el ADN. Las puntas de los brazos de la Y sobresalían de la molécula del ácido nucleico, en vez de doblarse a su alrededor. Una disposición a todas luces improbable, puesto que las argininas y lisinas del segmento protuberante persisten a lo largo de la evolución y, por consiguiente, se hallan implicadas sin duda en la unión con el ADN. A mayor abundamiento, comprobamos que la substitución de estos aminoácidos por otros obstaculizaba la unión.

En definitiva, nos vimos forzados a aceptar que, si la región de arg/lys era helicoidal, debía la hélice quebrarse en algún punto para poder plegarse. Desconcertados, volvimos a examinar nuestra gavilla de 11 proteínas. A pesar de que las regiones arg/lys carecían de glicina y prolina, obstáculos clásicos para la formación de hélices, todas ellas poseían el aminoácido asparagina en la misma posición. Lo mismo que la prolina y la glicina, la asparagina interrumpe las hélices.

Con la ayuda de Paul B. Sigler y su equipo, de la Universidad de Yale, refinamos nuestro modelo molecular e incluimos una rotura de la hélice en la asparagina invariante. El nuevo modelo permitía que la extensión completa de las regiones de arg/lys, incluidas las partes originariamente protuberantes, contactaran sin solución de continuidad con el surco mayor de la molécula de ADN. Esa forma que tienen las regiones del dímero de proteína de enlazarse con el ADN semeja la llave de tijera que aplican los atletas de lucha libre cuando cierran sus piernas alrededor del torso de sus oponentes.

Establecido ya que muchas proteínas se encastraban para formar dímeros, mi equipo comenzó a cuestionarse la razón en cuya virtud podría la evolución haber primado esa estructura en cremallera para muchos reguladores génicos. Según nuestro criterio, la ventaja principal de esa configuración podría esconderse en la creación de heterodímeros por entrecruzamiento de proteínas distintas.

Para explicar la coherencia lógica de ese enfoque, debo actualizar el modelo de regulación génica descrito al principio. Recordemos que, para que un gen pueda activarse, cada motivo del ADN de su promotor y potenciador ha de unirse a una proteína reguladora. Esta unión por sí sola no basta. Por lo que se observa, las proteínas que se unen al ADN han de "encajar" también, de manera holgada, con otras proteínas que se enlazan con motivos estructurales vecinos.

Cierto número de proteínas diferentes parecen capacitadas para reconocer y unirse a un motivo determinado; en teoría habría, pues, varias combinaciones de moléculas que podrían cubrir un potenciador o promotor particular. Muchos investigadores consideran, sin embargo, que sólo una de las permutas posibles activará el promotor o potenciador de un gen.

En otras palabras, solamente una combinación de proteínas reguladoras se articulará en una "llave" que posea la forma tridimensional correcta para regular la transcripción. Basta que las células carezcan de una pieza de la llave, que el autor suele comparar con un rompecabezas, para que no puedan activar el gen correspondiente. Por consiguiente, permanecerá silencioso aquel gen de la célula privada de una simple subunidad de un dímero crucial o de una proteína que interaccione debidamente con dicha subunidad.

De acuerdo con este razonamiento, las series de motivos de un potenciador o promotor forman el molde del rompecabezas. Las piezas del rompecabezas real son las propias proteínas reguladoras de genes. Y seguimos sin saber por qué esos rompecabezas ensartados sobre el ADN posibilitan el proceso de transcripción. Lo que estimula todavía más el empeño de la investigación.

Dentro de ese marco teórico, adivino dos ventajas que las proteínas reguladoras heterodiméricas pueden ofrecer a un organismo. En una línea de razonamiento (o escenario), la ventaja derivaría de la capacidad que poseen las regiones arg/lys de un heterodímero proteico de reconocer dos secuencias nucleotídicas distintas en el seno de un mismo motivo de ADN. Esta capacidad ampliaría el repertorio de elementos reguladores utilizables por un organismo, ya que la presencia de heterodímeros permitiría a las células emplear motivos con díadas asimétricas; a diferencia de los de simetría en díada, tales motivos poseen mitades diferentes.

El repertorio crecería en la hipótesis exclusiva de que los homodímeros se limitaran al reconocimiento de motivos con simetría diádica. Ahora bien, mi equipo ha hallado pruebas, todavía provisionales, de que homodímeros y heterodímeros están capacitados para unirse, con igual eficacia, a motivos asimétricos. Quizá no empleemos, en el estudio de la unión con el ADN, un método lo bastante refinado para reproducir las condiciones del interior de la célula viva. Sin embargo, de confirmarse nuestros resultados iniciales, éstos respaldarían el valor específico y autónomo de los heterodímeros.

En una opción alternativa, los heterodímeros podrían servir para aumentar el número de rompecabezas distintos que se constituirían a partir de un conjunto limitado de proteínas reguladoras. Para que esa posibilidad adquiera significado, hemos de comenzar por describir un nuevo dominio funcional que se ha hallado en las proteínas reguladoras de genes.

Debemos a Ptashne y su colega Ann Hochschild el caer en la cuenta de que la activación génica instada por proteínas unidas al ADN podría conseguirse mediante porciones de las proteínas reguladoras, fragmentos que son distintos de las partes responsables de la unión con el ácido nucleico. Estudiando la proteína cI codificada por el bacteriófago lambda (un virus que infecta las bacterias), demostraron que, en lo concerniente a la unión con el ADN, no resultaba indispensable la existencia de una región crítica para la activación génica. Los investigadores de Harvard predijeron que este dominio activador de la cI interaccionaría con la ARN polimerasa que ejecuta la transcripción.

Las proteínas de cremallera de leucina, incluidas las C/PEP, Fos, Jun y GCN4, poseen dominios funcionales que son distintos de sus segmentos formadores de cremallera y de unión al ADN; por analogía, podemos llamarlos dominios de activación. No se conoce todavía qué función bioquímica desempeñan estas regiones, aunque quizá sirvan para amarre de otras proteínas. Dominios que habrán de diferir incluso en el ámbito de familias de proteínas susceptibles de dimerización mixta. Por tanto, dos variedades de C/PEP que se encastren entre sí poseerán, cada una de ellas, su propio dominio de activación, lo mismo que las Fos y Jun, que, recordémoslo, se combinan entre sí.

Los heterodímeros de proteínas con cremallera de leucina podrían ampliar, en consecuencia, la cifra de rompecabezas de un organismo, ya que cada dominio de activación de las subunidades diméricas podría unirse a una proteína distinta. Si sólo hubiere homodímeros, las proteínas que contactasen con un dímero unido al ADN tendrían que ser, por contra, siempre idénticas.

La importancia encerrada en los heterodímeros ha quedado resaltada a raíz de descubrirse que el entrecruzamiento mixto sucede probablemente en muchas clases de proteínas reguladoras, sin ceñirse en exclusiva a las que poseen cremalleras de leucina. En este contexto, Harold Weintraub, del Centro de Oncología Fred Hutchinson en Seattle, y David Baltimore, de la Universidad Rockefeller, han detectado entrecruzamientos mixtos (a través de mecanismos distintos de la cremallera de leucina) en una clase de reguladores génicos, sin relación con los anteriores: las proteínas hélice-lazo-hélice (HLH). Weintraub y su colega Andrew B. Lasser han demostrado que una de ellas, la proteína MyoD, es esencial para la especialización de las células musculares.

Aunque me he concentrado en este artículo en las proteínas con cremallera de leucina, debe quedar bien claro que intervienen muchas clases de proteínas reguladoras de genes en la activación génica y la especialización celular. A modo de ejemplo, por James E. Darnell, Jr., sabemos que varias proteínas reguladoras de diverso origen promueven las actividades especializadas de los hepatocitos diferenciados.

A quienes trabajamos en el desciframiento de la especialización celular nos corresponde ahora averiguar por qué esas diferentes proteínas reguladoras de las células encajan juntas en sus moldes de ADN y se comunican entre sí. El descubrimiento de la cremallera de leucina ha resuelto parte del problema. Nadie sabe cuándo conoceremos el resto; pero el problema parece, por fin, resoluble.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE LEUCINE ZIPPER: A HYPOTHETICAL STRUCTURE COMMON TO A NEW CLASS OF DNA BINDING PROTEINS. W. H. Landschulz, P. F. Johnson y S. L. McKnight en *Science*, vol. 240, págs. 1759-1764; 24 de junio de 1988.

EUKARYOTIC TRANSCRIPTIONAL REGULATORY PROTEINS. Peter F. Johnson y Steven L. McKnight en *Annual Review of Biochemistry*, vol. 58, págs. 799-839; 1989.

EVIDENCE THAT THE LEUCINE ZIPPER IS A COILED COIL. E. K. O'Shea, R. Rutkowski y P. S. Kim en *Science*, vol. 243, págs. 538-542; 27 de enero de 1989.

THE DNA BINDING DOMAIN OF THE RAT LIVER NUCLEAR PROTEIN C/EBP IS BIPARTITE. W. H. Landschulz, P. F. Johnson y S. L. McKnight en *Science*, vol. 243, págs. 1681-1688; 31 de marzo de 1989.

ACTION OF LEUCINE ZIPPERS. Ted Abel y Tom Maniatis en *Nature*, vol. 341, n.º 6237, págs. 24-25; 7 de septiembre de 1989.

SCISSORS-GRIP MODEL FOR DNA RECOGNITION BY A FAMILY OF LEUCINE ZIPPER PROTEINS. C. R. Vinson, P. B. Sigler y S. L. McKnight en *Science*, vol. 246, págs. 911-916; 17 de noviembre de 1989.

Ciencia y sociedad

Hol Chan

La mayoría de las barcas de pesca que salen de Caye Caulker, una del casi medio millar de islitas desparramadas ante Belize, llevan a bordo, por redes o nasas, buceadores. Sustitución que les supone una cosecha más lucrativa. La pintoresca flotilla navega hacia una reserva marina llamada Hol Chan, expresión maya que significa "pequeño canal".

Belize, un minúsculo país centroamericano, está flanqueado por un espléndido arrecife de barrera, el segundo del mundo por su longitud. Para protegerlo de la sobrepesca, la contaminación y el acoso del hombre, se han creado varios parques marinos. En un giro extraño, las medidas de conservación que sirvieron para atraer el turismo se vuelven en ayuda múltiple para los pescadores.

Existen unos 300 de estos santuarios marinos en todo el mundo, y su número va en aumento. El pasado invierno, por ejemplo, el gobierno de los Estados Unidos convirtió en reserva 2600 millas marinas cuadradas de los Cayos de Florida. Pero queda mucho por defender. Sólo el 16 por ciento de los parques marinos del Caribe, sin contar los norteamericanos, poseen el tratamiento legislativo adecuado.

Hol Chan es uno de ellos. De su éxito se está beneficiando la integridad del arrecife y, por extraño que parezca, el sector pesquero. Se está viendo que las especies de interés comercial comienzan a proliferar en el interior de la reserva y en su periferia. "Estamos asistiendo a una multiplicación de langostas, estrombos reinas y meros", dice James Azueta, director de la reserva. La recuperación de esas especies, sometidas a intensa sobrepesca lo mismo en Belize que en otras zonas del Caribe, se ha ganado la voluntad de los pescadores beliceños, recelosos en un comienzo porque temían que la declaración de parque arrastrara la pérdida de un importante caladero.

Una idea nueva, y polémica, ésta de ligar la conservación a la gestión de las pesquerías. "Todos la ven condenada al fracaso, porque no pueden ponerse puertas al movimiento de los peces", declara James Bohnsack, biólogo marino que acaba de presentar un informe sobre el tema para un organismo público estadounidense.

El sí está convencido de que los arrecifes constituyen los lugares idóneos para esa relación. La mayoría de peces arrecifales tienden a ser sedentarios y longevos, y su fertilidad aumenta con la edad, apostilla ahora Jacque Carter, biólogo marino de la Universidad de Nueva Inglaterra en Maine, encargado de estudiar la evolución de la diversidad específica en Hol Chan. Así, proteger una porción del arrecife es como establecer un vivero. Las crías pueden después dispersarse y ser pescadas, como en Belize. Sin esta protección, los peces más viejos se eliminarían y se deprimiría la población.



1. LAS LANGOSTAS están volviendo a las aguas de Belize. Foto: Al Grotell

Varios informes dan fe del éxito de este enfoque. Bohnsack, por ejemplo, encontró un aumento rápido de grandes peces depredadores (entre ellos gruñones —Pomadásidos— y pargos —Lutiánidos—) a los dos años de haberse prohibido la pesca submarina en Cayo Looe, en Florida. Otros estudios relativos a lo experimentado en Australia, Nueva Zelanda y las islas Cayman corroboran esa tendencia positiva para la industria pesquera.

No todos, sin embargo, están por esa labor. En una reunión reciente del Consejo para la Gestión de las Pesquerías del Atlántico Sur, el plan de Bohnsack se rechazó. Aunque los optimistas empedernidos dirán que por lo menos se consideró. Se le objetaba, entre otras cosas, la división en grandes reservas del 20 por ciento del distrito marino sudoriental de las aguas territoriales de los Estados Unidos. Aunque la elección pudiera tener su punto de arbitrariedad, Bohnsack defiende que el 20 por ciento es el nivel mínimo crítico que se precisa para proteger la población.

Al margen de las ventajas pesqueras que reporta la reserva, ésta debe crearse por su propio valor intrínseco, argumentan los científicos. Según las Naciones Unidas, los arrecifes de 90 países se hallan amenazados.

Genes y estilo

"Si la vida tuviese una segunda edición, ¿cómo corregiría yo las pruebas?", se preguntaba el poeta romántico John Clare. Algunos le han tomado la vez: numerosos organismos revisan sus pruebas mientras van escribiendo su vida. A lo largo de los últimos cinco años, han ido descubriéndose señales inequívocas de que, en el caso de ciertas proteínas, se interpola el texto (ARN) de la primera redacción de éste (transcripción). Tan sorprendente fenómeno de corrección del ARN podría ser un viejo recuerdo de épocas evolutivas precedentes. Pero también pudiera constituir un punto de apoyo para el tratamiento de la enfermedad del sueño y otras de idéntico carácter parasitario.

Con la perspectiva que nos da la historia, hoy podemos quejarnos de la excesiva simplicidad que distinguía, tiempo atrás, a los principios fundamentales de la biología molecular. Los genes eran secuencias coherentes de ADN. Suponíase que las secuencias de ADN se transcribían en secuencias complementarias de ARN mensajero. Este ARNm dirigía, a continuación, el ensamblaje de los aminoácidos para dar lugar a la co-

rrespondiente proteína. El sistema parecía tan preciso y predecible como un reloj. Cualquiera que dispusiera de una secuencia de ADN se creía capaz de derivar, a partir de ella, la secuencia del ARN y, en consecuencia, el orden de los aminoácidos en la correspondiente proteína.

De quince años a esta parte, se ha ido comprobando que las cosas eran menos lineales. Comenzó por descubrirse que la estructura génica encerraba mucha mayor complejidad. Observóse, más tarde, que ciertas moléculas de ARN gozaban de una sorprendente actividad enzimática. A mediados de los años ochenta, y a raíz del estudio del procesamiento de las proteínas mitocondriales en diversas especies de tripanosomas (Protozoos parásitos), se realizó el imprevisible hallazgo de que ciertos ARNm eran mayores en longitud, y contenían por tanto más bases, que el ADN de sus correspondientes genes. Las bases extra, que siempre eran uridinas, resultaban esenciales para la fabricación de proteínas funcionales. Es más, sin estas misteriosas adiciones algunas secuencias de ADN constituirían un incomprensible galimatías.

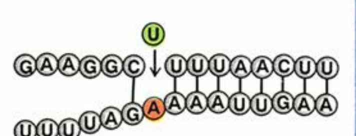
El caso más espectacular lo expusieron, en 1988, Jean E. Feagin, parasitólogo del Instituto de Investigación Biomédica de Seattle, y sus colaboradores de la Universidad de Washington. Se trataba del parásito causante de la enfermedad del sueño (*Trypanosoma brucei*), cuyo ARNm constaba, en más de la mitad, de uridinas sin codificar por la correspondiente secuencia de ADN.

Situaciones similares se han observado en otros parásitos, varias plantas verdes, un virus del sarampión, huevos de ranas e incluso en humanos. Las alteraciones postranscripcionales que aparecían en el ARN diferían, con frecuencia de manera característica, según el grupo de organismo. Y quizá porque nadie sabía el origen de tales modificaciones se englobaron todas ellas bajo el epígrafe común de "corrección estilística del ARN". "Me resistía a creer en la posibilidad de mecanismos de corrección en el ARN; prefería verlos como artefactos experimentales", confiesa Larry Simpson, de la Universidad de California en Los Angeles (UCLA).

Ello no le impidió, en 1990, aportar con su equipo lo que se considera la mejor contribución al conocimiento de ese fenómeno, cuando hicieron público su descubrimiento de un conjunto de moléculas de ARN que denominaron "ARN guía". El grupo de Simpson estaba investigando la organización de los maxicírculos y minicírculos, pequeños anillos entrelazados

Cómo se corrige el ARN mensajero

1 Una molécula de ARN guía se aparea al ARN mensajero. Algunas bases permanecen desapareadas en el seno de bases perfectamente complementarias.



2 El ARN mensajero es cortado en el lugar del desapareamiento por enzimas. Una nueva base es añadida y la molécula es reparada.

3 La adición de bases al ARN mensajero introduce nueva información genética en el mismo. Un nuevo desapareamiento señala el lugar de la siguiente corrección.

SIGUIENTE BASE DESAPAREADA

de ADN que se encuentran en las mitocondrias de los tripanosomas y protozoos emparentados. Algunos habían analizado la secuencia de estos anillos para determinar su posible intervención en el proceso de corrección del ARN; ningún círculo parecía capaz.

Así las cosas, Beat Blum y Norbert Bakalara, del equipo de UCLA, abordaron el problema desde un enfoque distinto. La complementariedad de bases tanto en el ARN como en el ADN suele persistir invariable. Las adeninas siempre se aparean con timinas o uridinas, mientras que las guaninas lo hacen con citidinas. Ahora bien, la teoría permite que las guaninas también se enlacen con uridinas dando lugar a un apareamiento más inestable. Cuando Simpson y sus colaboradores introdujeron los apareamientos guanina-uridina, advirtieron que los ARN transcritos a partir de los maxicírculos podían dirigir la inserción de bases en otras moléculas de ARN. Más avanzada la investigación, se demostró que los minicírculos producían también ARN guía.

De acuerdo con el mecanismo general propuesto por Simpson, un bucle del ARN guía se aparea con el ARNm a corregir. Las dos moléculas encajan como una cremallera, pero algunas bases de la molécula guía permanecen desapareadas, rodeadas de bases correctamente apareadas; los dientes de la cremallera no encastran finamente. Allí donde se aprecien semejantes irregularidades podremos añadir nuevas bases al ARNm.

El pasado mes de febrero, y en la revista *Cell*, Thomas R. Cech, uno de los descubridores del ARN catalítico, sugería la posibilidad de que las colas ricas en uridina de los ARN guía cedieran algunas de sus propias uridinas a los ARNm. Por tanto, estas moléculas de ARN no solamente dirigirían el proceso de corrección, sino que constituirían también la fuente del material añadido. Simpson ha desarrollado una teoría similar.

El modelo simpsoniano de los ARN guía no explica todas las formas de corrección del ARN que se han observado, y que van saliendo a la luz. En el último enero, Dennis L. Miller, y sus colaboradores de la Universidad de Texas en Dallas, anunciaron en la revista *Nature* el descubrimiento de un nuevo ejemplo de corrección del ARN en el moho *Physarum polycephalum*.

El descubrimiento del grupo de Dallas tiene su interés. Se muestra, por primera vez, que otras bases, en este caso citidinas, se van incorporando al proceso de corrección. "No veo especial dificultad en que los ARN guía intervengan en la identificación del lugar de inserción en el sistema de los tripanosomas", comenta Miller. "Pero no acaba de convencerme su presencia en nuestro sistema."

Por encima de la pregunta sobre el cómo de la corrección del ARN, importa averiguar la razón de la misma. "Podría haber sido un proceso genético en las bacterias simbióticas que originaron las mitocondrias", indica Simpson. "Quizás un mecanismo de corrección de errores. Ha divagado mucho la imaginación a ese propósito." En cualquier caso, añade, "los tripanosomas parecen haber mantenido este mecanismo como una manera de regular la función mitocondrial durante su ciclo celular". En *T. brucei*, por ejemplo, la corrección del ARN y la expresión de los genes mitocondriales se dan sólo cuando el parásito madura en el interior del insecto huésped, pero no cuando parasita humanos.

Esta circunstancia abre nuevas perspectivas en el tratamiento de enfermedades parasitarias todavía incurables. "Mediante la inhibición selectiva de enzimas implicadas en el proceso de corrección, podríamos atacar al parásito sin dañar al huésped", explica Simpson. "Siempre que se descubre, en un parásito, un proceso bioquímico que le es exclusivo, éste se convierte en el objetivo obvio de intervención."

El punto de congelación

Durante los últimos años, químicos y físicos han venido prestando especial atención a los microagregados, grupos de átomos que exhiben propiedades que están a medio camino entre los átomos y las pellas de materia. Los átomos se agrupan de acuerdo con las reglas de la mecánica cuántica y forman agregados de geometría variable. En cambio, los cuerpos sólidos están formados por cristales, o celdas elementales que se repiten en una geometría dada. A los científicos les gustaría saber cuántos átomos se necesitan para que un agregado deje de serlo. Un punto que puede orientarles a este respecto sería el de averiguar cuántos átomos se precisan para que se organicen en alguna forma regular, es decir, cuándo deja el agregado de comportarse como un líquido y se convierte en sólido.

La cifra en cuestión podría rondar los 1500 átomos. T. Patrick Martin y sus colegas, del Instituto Max Planck de Física del Estado Sólido, han estudiado agregados de átomos de sodio, formados al calentar una fuente de sodio para posteriormente evaporar los átomos en helio a 150 kelvins (−123 grados Celsius). Los microagregados se ionizan y pasan a través de un espectrómetro que determina sus masas.

Aunque pueden formarse microagregados de todos los tamaños, los hay muy estables, que no se ionizan con facilidad. La estabilidad corresponde a "números mágicos" de átomos que componen el microagregado y que resultan de la disposición de los electrones según los principios de la mecánica cuántica. Al igual que los gases inertes, los microagregados con un número mágico de átomos actúan como si tuvieran una capa electrónica llena.

En metales como el sodio, al añadir un átomo al agregado su electrón se une a otros electrones de niveles de energía, u orbitales, comunes. "Estos electrones se mueven alrededor de todo el agregado", explica Martin; por tanto, el agregado se transforma para dar cabida a los electrones adicionales. Carente de estructura geométrica definida, el microagregado se comporta, en su desarrollo, como si fuera un líquido.

Pero cuando los agregados superan el tamaño de 1500 átomos, se opera un cambio profundo en su forma de agregación. Aparecen otros números mágicos distintos. La morfología de los grandes agregados (de unos 22.000 átomos, límite del equipo usado) permanece fija, sin atenerse en adelante a las reglas de la mecánica cuántica concernientes a la distribución de los electrones. Ahora, los números mágicos corresponden a la formación de capas de átomos, a modo de catafilos en torno al núcleo. Según señala Martin, los átomos son los que se organizan en capas de icosaedros.

Para Martin, ese desplazamiento de los números mágicos evidencia la transición de un estado plástico a un estado rígido, quizás una transición de fase de líquido a sólido. "Los átomos de la superficie del sólido se mueven con más libertad que los átomos del interior", afirma. En los microagregados pequeños, casi todos los átomos se hallan en la superficie y, por consiguiente, se funden (es decir, se mueven como lo hacen las moléculas de un líquido) mucho antes que los agregados mayores.

Robert L. Whetten, físico-químico de la Universidad de California en Los Angeles, se muestra más cauto. Que los microagregados sean un líquido "es una idea sugestiva, aunque tal vez innecesaria". Para comprobar si los microagregados de sodio formaban capas geométricas al enfriarse hasta una temperatura en que deberían ser sólidos, Whetten los colocó, mediante nitrógeno líquido, entre 30 y 100 kelvins. Y observó que el elemento determinante de la estabilidad era la distribución electrónica, prueba en que se funda la opinión de Martin sobre el estado plástico o líquido.

Whetten llegó así a la siguiente conclusión: según todos los indicios, los agregados de menos de 1500 átomos son sólidos.

Whetten admite la posibilidad de que sólo la superficie del agregado sea líquida. Y, en verdad, algunos experimentos sugieren que, para cierto tamaño del agregado, coexisten ambas fases. Pero si los microagregados son líquidos, "les será difícil a los teóricos explicarlo", repone Whetten. El sodio funde a 371 kelvins. El trabajo de Martin muestra que los agregados de sodio se deforman a 150 kelvins. "El que la temperatura de fusión pueda ser la mitad o un tercio de la del material completo no deja de ser sorprendente", y él lo admite, no sin dejar claro que no habrá ninguna conclusión definitiva acerca de los microagregados hasta que se consiga observarlos uno a uno. Y esa proeza está todavía muy lejos.

Perfil de un revolucionario recalcitrante

"¡Mire!", dice Thomas Kuhn. Y con esta palabra, que repite a menudo, parece indicar que su interlocutor o no le ha entendido bien o corre el peligro de no entenderle, y que él, Kuhn, está intentando —probablemente en vano— aclararle el complicadísimo asunto.

"¡Mire!", vuelve a decir mientras inclina su larguirucho talle y su alargado rostro hacia delante y deja caer un poco su grueso labio inferior, que, en las comisuras, se le suele curvar amablemente hacia arriba.

"Le juro a Ud. que, si pudiese elegir entre haber escrito o no mi libro, elegiría haberlo escrito. Pero las respuestas que se le han dado han sido, en ciertos aspectos, muy enojosas."

El "libro" en cuestión es el que lleva por título *The Structure of Scientific Revolutions* ("La estructura de las revoluciones científicas") y se le considera el más influyente tratado de cuantos se han escrito acerca de cómo progresa (o no progresa) la ciencia. Desde su publicación en 1962, se han vendido aproximadamente un millón de ejemplares, habiéndosele traducido a 16 lenguas, y su lectura sigue siendo todavía fundamental en los cursos de historia y filosofía de la ciencia.

El libro es notable por haber puesto en boga el tendencioso término de "paradigma". Y lanzó también al mundo la hoy manida idea de que las personalidades y la política desempeñan un importante papel en la evolución de la ciencia. Quizás el tema más profundo del libro no sea tan obvio: el de que los científicos nunca pueden entender del todo el "mundo real", o inclusive —en muy alta proporción— son incapaces de entenderse entre sí.

Con esta temática parece que lo más normal hubiera sido que Kuhn, profesor de 68 años de edad que enseña filosofía e historia de la ciencia en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, se esperase que sus ideas iban a ser mal comprendidas. Pero él, en cambio, todavía se muestra a disgusto ante la mucha incomprensión y las persistentes acusaciones que le hacen, por ejemplo, de creer que los científicos son "irracionales". "Si hubiesen dicho 'arracionales', no me habría importado en absoluto", recalca sin sonreír siquiera.

El temor a que aumente la confusión sobre su obra le ha hecho a Kuhn un poco receloso de las entrevistas. Aunque por fin accede a hablar para *Investigación y Ciencia* sobre su carrera (tras haberse desahogado respecto a que en 1964 SCIENTIFIC AMERICAN dio de *La estructura* "la peor recensión de cuantas puedo recordar"), ha de insistir primero en las limitaciones del ejercicio. "Uno no es su propio historiador", nos advierte, "y menos aún su psicoanalista".

Así y todo, Kuhn se remonta, para explicarnos su manera de ver la ciencia, hasta un instantáneo "¡Eureka!" que le advino en 1947. Trabajaba a la sazón, para doctorarse en física, en la Universidad de Harvard, cuando le pidieron que enseñara algo de ciencias a unos universitarios que hacían carreras humanísticas. Buscando un ejemplo histórico sencillo con el que ilustrar los orígenes de la mecánica newtoniana, abrió Kuhn la *Física* de Aristóteles y se asombró de lo "equivocado" que éste estaba. ¿Cómo era posible que alguien tan esclarecedor en otros campos anduviese tan desorientado en el de la física? Daba vueltas Kuhn en su mente a este misterio, mientras miraba el paisaje que se veía desde la ventana de su dormitorio ("Aún puedo ver los emparrados y la sombra que hacían sobre dos terceras partes del camino de debajo"), cuando, de pronto, Aristóteles "tuvo sentido".

Kuhn cayó de repente en la cuenta de que Aristóteles concebía cosas tan fundamentales como el movimiento o la materia de un modo totalmente distinto de como las concebía Newton. Por ejemplo, Aristóteles empleaba el vocablo "movimiento" para referirse, no precisamente al cambio local o de posición, sino al cambio en general —tanto al enrojecimiento del Sol como a su descenso hacia el horizonte. Entendido en sus propios términos, Aristóteles no era, como físico, "un mal Newton", dice Kuhn, sino algo totalmente diferente.

Aunque Kuhn prosiguió sus estudios hasta doctorarse en física, poco después se pasó al terreno de la historia de la ciencia, con el propósito de explorar los mecanismos que constituyen la tramoya de los cambios en la escena científica. Se debatió con las ideas que fue suscitando en él Aristóteles a lo largo de 15 años —durante los cuales escribió también una historia de la revolución copernicana y dejó Harvard para ir a enseñar a la Universidad de California en Berkeley... todo ello antes de haber terminado *La estructura*. "Me costó mis sudores de sangre", asegura, "pero, por fin, logré hacer un descubrimiento".

El descubrimiento fue su concepto de paradigma. Antes de Kuhn, "paradigma" significaba simplemente "ejemplo" o "muestra ejemplar" (de uso frecuente en la enseñanza de las lenguas, tal como el *amo*, *amas*, *amat* en la del latín). En su obra *La estructura...*, da Kuhn al término "paradigma" un significado más restringido, entendiéndolo como "experimento arquetipo" o "modo prototípico de solucionar un problema" —cuales lo fueron la (probablemente apócrifa) demostración de Galileo en la torre de Pisa o el experimento de la doble rendija con que se probó la naturaleza corpuscular-ondulatoria de la luz— que *implícitamente* les dice a los científicos cómo han de ver el mundo. Los científicos construyen complicados sistemas teóricos y metodológicos basándose siempre en un determinado paradigma (a veces, en *La estructura...* se refiere también Kuhn a tales sistemas científicos como a paradigmas), pero esos sistemas nunca pueden ser explicados formalmente. Porque en última instancia dependen de factores subjetivos, a saber, de cómo interpretan los científicos el experimento paradigmático.

Los hombres de ciencia, según los describe Kuhn, son profundamente conservadores. Una vez adoctrinados acerca de un paradigma, se dedican, por lo general, a entretenerse resolviendo acertijos o rompecabezas, problemas cuyas soluciones refuerzan y amplían la vigencia del paradigma, en vez de dedicarse, más bien, a cuestionar su validez y a superarlo innovadoramente. A ese quehacer conservador lo llama Kuhn "labores de limpieza y de mantenimiento". Pero siempre surgen anomalías, fenómenos que el paradigma no puede ya explicar o que lo contradicen directamente. Con frecuencia, estas anomalías son ignoradas, se las pasa por alto. Pero si se acumulan pueden promover toda una revolución (por otro nombre un "cambio de paradigma", aunque originariamente no lo llamase así Kuhn), haciendo que los científicos abandonen el viejo paradigma y adopten otro nuevo.

A la vez que niega que haya que concebir la ciencia como un continuo proceso constructivo, sostiene Kuhn que una revolución es destructiva y también constructiva. Quien propone un nuevo paradigma se ha alzado a hombros de gigantes y, una vez ahí, apoyándose en las cabezas de éstos, les obliga a bajarlas. Esa persona, él o ella, suele ser joven y nueva en el campo de que se trate, o, lo que es lo mismo, no suele estar enteramente adoctrinada.

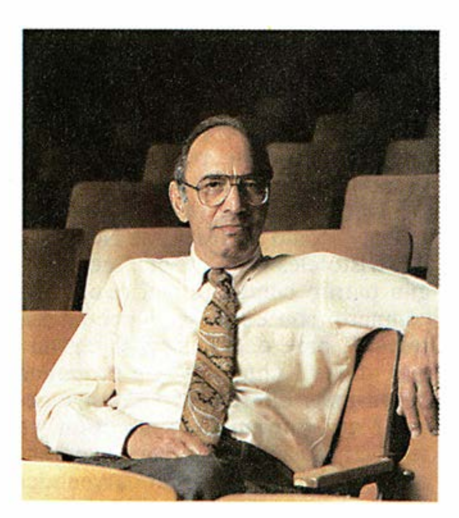
La mayoría de los científicos se resisten a ser revolucionarios. Muchos de ellos no entienden el nuevo paradigma y echan de menos unas normas "objetivas" para enjuiciarlo. (Si esas normas existiesen, podría dejárseles la enjuiciación a las computadoras.) En cierto sentido, paradigmas diferentes —como las físicas de Newton y de Aristóteles— no pueden tener ningún patrón común por el que se las compare: son entre sí "inconmensurables", para decirlo con el término que utiliza Kuhn. Los que proponen paradigmas diferentes podrían mantener una interminable discusión sin resolver jamás sus diferencias, puesto que emplean términos fundamentales —movimiento, partícula, tiempo, espacio— dándoles diferentes significaciones.

La "conversión" de los científicos es, por tanto, un proceso a la vez subjetivo y político. Puede explicar una intuición o comprensión repentina —como la que tuvo Kuhn al final de sus cavilaciones sobre Aristóteles. Pero a menudo los científicos adoptan un paradigma simplemente porque lo propugnan colegas de gran renombre o porque en la comunidad científica lo ha aceptado ya una mayoría.

Tal vez el nuevo paradigma sirva mejor que el caducado para resolver ciertas incógnitas, y quizá tenga también más aplicaciones prácticas. Pero esto, según Kuhn, en modo alguno quiere decir que sea un reflejo más exacto de la realidad. Y Kuhn rechaza también la noción de "falsación" que ha promulgado Karl Popper. El mundo real es en sí incognoscible, y las proposiciones son verdaderas o falsas tan sólo dentro del contexto de un determinado paradigma: esto es lo que sostiene Kuhn.

Su libro suscitó diversas reacciones. La mayoría de los especialistas en ciencias "duras" se encogieron de hombros y siguieron haciendo lo que hacían. En cambio, muchos de los versados en las ciencias sociales o "blandas" acogieron el libro "de mil amores", al decir de Kuhn, quizá porque les daba esperanzas de que estos saberes llegarían a alcanzar el mismo nivel de legitimidad (o de ilegitimidad) que los de los físicos o los químicos. "Hasta hubo quienes se dijeron: '¡Fantástico! ¡Ahora todo lo que tenemos que hacer es trazar nuestro paradigma y reforzarlo!'", explica Kuhn.

Por otro lado, no faltaron filósofos que deplorasen el brusco abandono por Kuhn del empirismo y de la verdad objetiva. Se le acusó de pretender que la ciencia no es más que "poder político" o "psicología de masas". "Mire Ud., creo que tal acusa-



1. Thomas S. Kuhn.
Foto: Stan Rowin.

ción carece de sentido, y estoy dispuesto a demostrarlo", dice Kuhn acalorándose.

Pero todavía le han disgustado más los que, admirándole, le malinterpretan. "Se me ha solido decir que estoy mucho más orgulloso de mis críticos que de mis admiradores", comenta. En la década de los sesenta su obra fue enarbolada como bandera por radicales opuestos a la ciencia, y a su derivado la tecnología, así como a toda "autoridad cognitiva" que quitase valor a la "pura experiencia". Kuhn recuerda a estudiantes que le decían: "¡Gracias, gracias, señor Kuhn, por hablarnos de los paradigmas! ¡Ahora que los conocemos podremos librarnos de ellos!"

Las protestas de Kuhn no servían de nada. En un seminario —nos cuenta— el profesor y los estudiantes estaban discutiendo "cómo mi libro negaba las ideas de verdad y falsedad". El trató de explicarles que, dentro del contexto de un paradigma, los conceptos de verdad y falsedad eran perfectamente válidos e inclusive necesarios, pero el tal profesor le atajó diciendo: "Usted desconoce hasta qué punto es radical este libro".

Algunos de aquellos estudiantes quizá sean ahora miembros de una nueva escuela de antropología que analice la ciencia desde un punto de vista "post-kuhniano". La meta de esta "pujante" disciplina, según un reciente ensayo sobre *La Antropología actual*, es "una radical deconstrucción de los que tradicionalmente se concebía que eran los fundamentos del saber científico, e introduce la duda en todos los campos de estudio con pretensiones científicas". "Deconstrucción es para mí una palabra repelente", dice Kuhn, "aunque estoy seguro de que ello se debe, sobre todo, a que ignoro por completo el tema".

Concede Kuhn que él es, en parte, culpable de algunas de las interpretaciones anti-ciencia que de su libro se han hecho. Al fin y al cabo, es cierto que en *La estructura...* califica alguna vez de "adictos" a los científicos. Compara su adhesión a los paradigmas con la fe religiosa, y parangona su educación con el lavado de cerebro que describió Orwell en su totalitaria novela *1984*. También reconoce Kuhn que los términos "rompecabezas" y "labores hogareñas" pueden sonar un poquito a guasona suficiencia. "Ni por un momento querría retirarlos, y aun quizá debería haber dicho más cosas sobre ese glorioso conformarse con resolver adivinanzas."

Insiste Kuhn, con explícito deseo de que tomemos buena nota de ello, en que él está, de facto, a favor de la ciencia. Y también a favor de los paradigmas. Pues éstos proporcionan la base segura que necesitan los científicos para organizar el caos de la experiencia y para dilucidar enigmas todavía más complicados. Es el conservadurismo de la ciencia, su rígida adhesión a paradigmas —insiste— lo que la capacita para producir "los mayores y más originales estallidos de creatividad" de toda la empresa humana.

En 1964 Kuhn dejó Berkeley y se fue a los más tranquilos aledaños de la Universidad de Princeton. Tras haber procurado mantener durante varios años un digno silencio acerca de *La estructura...*, escribió finalmente algunos ensayos en los que trataba de explicar lo que en realidad quiso decir. Se proponía, en concreto, salir por los fueros de su noción de "paradigma". El vocablo se había difundido como un virus hasta más allá del campo de la historia y la filosofía de la ciencia, infectando a muchísimos miembros de la comunidad intelectual, donde llegó a significar virtualmente lo mismo que "idea dominante".

De nuevo admite Kuhn que la culpa es, en parte, suya, por haber cometido el "fatal error" de dejar que paradigma denote, no sólo un experimento arquetípico, sino también "toda la constelación de creencias, valores y técnicas" que vinculan y unifican a una comunidad científica. (De hecho, un filósofo contó hasta 21 significados diferentes para el término "paradigma" en las páginas de *La estructura...*)

En un ensayo introdujo Kuhn el término "ejemplar" para sustituir al de "paradigma" en su sentido estricto, pero no obtuvo aceptación. Así que dejó de utilizarlo. "Mire Ud.", dice, "si coges a un gato por la cola, no tardas en tener que soltarlo y apartarte".

En 1978 publicó Kuhn una relativamente sencilla historia de la ciencia: *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912* ("La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912"). Sostiene ahí que el concepto de discontinuidad cuántica no fue Max Planck el primero en exponerlo, sino que, contra lo que suele creerse, fueron sus autores Einstein y Paul Ehrenfest. Piensa Kuhn que este libro, el quinto de los suyos y el más reciente, es "en algunos aspectos mi mejor obra". Sin embargo, varios físicos le acusaron de querer aumentar indebidamente, a expensas de Planck, los ya inigualables méritos y reputación de Einstein. Y aunque Kuhn asegura que el libro en cuestión lleva incorporadas las ideas de *La estructura...* a algunos lectores les molestó que no reexaminara explícitamente los problemas que allí se planteaban.

Poco después Kuhn dejó Princeton para pasarse al MIT, donde actualmente está trabajando y prepara la redacción de otro libro. Dice que en él abordará dos cuestiones que se suscitaron con *La estructura...* Una es la del concepto de inconmensurabilidad, la rotura de comunicación que ocurre entre los adherentes a distintos paradigmas. La otra tiene que ver con las semejanzas entre la evolución de la ciencia y la evolución de los organismos, de los seres vivos.

Kuhn establece esta analogía al comienzo mismo de *La estructura...* Hace allí notar que tal evolución va, no hacia algo —como hacia la verdad en el caso de la ciencia, o hacia ese dechado de sabiduría y nobleza que es el *Homo sapiens* en el caso de la evolución biológica— sino sólo apartándose de algo. Por lo demás, sugiere Kuhn que, así como las especies tienden, a lo largo del tiempo, a proliferar y a especializarse más cada vez, así también tienden a ello los diversos sectores científicos, confiando cada uno en su propio paradigma.

¿Cómo se concibe, según estas ideas, el futuro de la ciencia? ¿Se parecerá a una sinfonía que se diluya en disonancias, a un espejo que se vaya rompiendo en pedazos cada vez más pequeños? ¿Es ésta la inquietante posibilidad que hará objeto de su estudio Kuhn en su próxima obra?

Poniendo cara seria, Kuhn declina el referirse a ese libro futuro. "¡Mire Ud. —dice—, no quiero que se me puedan malinterpretar esas ideas antes incluso de haberlas publicado!"

Ciencia y empresa

¿Baja laboral o tiempos modernos?

En su *Tratado sobre las enfermedades de los artesanos* de 1700, Bernardino Ramazzini, médico y filósofo italiano, aludía a la "cosecha de dolencias" que los trabajadores sufrían por culpa de "movimientos irregulares y violentos y posturas forzadas del cuerpo". La edición de 1893 de la *Anatomía* de Gray hablaba de la torcedura de la mano de las lavanderas, una suerte de inflamación "en forma de salchicha".

Los nombres pueden haber cambiado, pero el dolor sigue siendo el mismo. Los tecnicismos "síndrome del túnel carpiano" o "tendinitis" podrían recibir una denominación más prosaica, aunque no menos precisa: parálisis del etiquetador (para un almacenero), pulgar del envasador de encurtidos (para quien trabaje en una fábrica de conservas) y ninjatendinitis (para un adolescente adicto a los videojuegos).

Múltiples expresiones que hablan de un problema muy extendido, resultante de la repetición enérgica de movimientos de la mano, muñeca y parte superior del cuerpo, lo mismo en el teclado de un ordenador que con una máquina herramienta o un equipo electrónico de exploración médica.

El número de bajas laborales se ha multiplicado en los últimos años. Quizá resida el motivo en la elevada productividad que se reclama en fábricas y oficinas, donde el trabajo se ha parcelado hasta la hiperespecialización y se ha vuelto mucho más iterativo. Han desaparecido el trabajo distendido y los turnos de sustitución en determinadas tareas. El empleado permanece en tensión la jornada entera.

En algunos países la administración comienza a tomar cartas sobre el asunto y endurece la normativa en caso de lesiones por trauma acumulativo. Se sanciona a la empresa por cada baja laboral que provenga de deficiencias estructurales en ese ámbito. Por ceñirnos a las grandes compañías del sector del automóvil y remitirnos a un país extranjero, la administración norteamericana ha impuesto multas millonarias a General Motors, Ford y Chrysler. Pero antes les había tocado el turno a los emporios de las conservas cárnicas: IBP y John Morrell & Co. El sector conservero había sido objeto de especial atención porque los obreros multiplican allí por 12 las lesiones por trauma acumulativo que sufren otros sectores, verbigracia, el textil.

El riesgo ha traído, como era de esperar, una ola de reclamaciones. Para atajar la demanda creciente de indemnizaciones, algunos patronos han recurrido a tratamientos médicos de dudosa eficacia: prescripción de pastillas de vitamina B_6, aplicación de compresas calientes a zonas ya inflamadas o exigir que los empleados mantengan inmovilizada una articulación dañada mientras continúan trabajando, práctica que puede exponerles a perjuicios ulteriores.

Ciertas publicaciones periódicas se han subido al carro de la inquietud y anuncian sin rebozo servicios que supuestamente miden la actividad nerviosa en la mano y muñeca y determinan el grado de exposición real al síndrome del túnel carpiano. La verdad es que no parece haber ninguna técnica segura para identificar los probables candidatos a la lesión.

Otros intentos más serios para evitar las lesiones recurren al desarrollo de herramientas que requieren menos fuerza y dejan que mano y muñeca operen en posiciones más naturales. De acuerdo con fuentes sindicales, la culpable de muchas lesiones por movimientos repetitivos ha sido cierta sierra eléctrica circular. Su fabricante se ha aprestado ya a sustituirla por otro prototipo que amortigua la vibración y permite un mejor agarre. En otra ocasión han sido los propios empleados de una gran empresa quienes han creado sus propios modelos para mangos de cuchillos de deshuesar y hojas en ángulo.

Pasemos de la fábrica a la oficina. La investigación ergonómica se encamina aquí hacia teclados que reduzcan la percusión seca y la flexión de la muñeca. Un modelo llamado TONY! divide el teclado en dos partes para permitir que los lados giren, o incluso se dispongan en ángulo hacia arriba en forma de A para acomodar las manos del operador. Otro nuevo modelo, AccuKey, tiene cuatro teclas por mano, y cada una alcanza tres posiciones posibles. Usando las ocho teclas, el operador puede formar "cuerdas" en un total de 5561 combinaciones, aunque sólo se usen por lo común unas 500.

Los ingenieros de nuevas herramientas se encuentran ante una dificultad añadida: carecen de bibliografía suficiente donde se exponga la interacción compleja entre fuerza, posición y repetición que se da en el trabajo manual en las fábricas y oficinas. Para ser claros, se desconoce cuántas repeticiones se necesitan para dañar una articulación.

La medida de la cantidad de fatiga de la muñeca y la mano es una ciencia inexacta. Se toma en vídeo el desarrollo de las distintas tareas; luego se observan en cámara lenta, anotando la postura del trabajador y el número de movimientos repetidos. Se registra también la cuantía de la vibración y el esfuerzo empeñado. (Los electromiógrafos permiten seguir la actividad en la superficie de los músculos para estimar la fuerza.)

El Centro de Ergonomía de la Universidad de Michigan en Ann Arbor ha estudiado modelos de herramientas y teclados que hacen mínima la fuerza y frecuencia de las labores manuales. Ha extraído modelos informáticos de maniquíes que pueden usarse en proyectos asistidos por ordenador para comprobar si una determinada posición de una herramienta violenta el ejercicio de la mano. Otras instancias preparan normas adecuadas de protección laboral.

Dado el número de solicitudes de indemnización no podían tardar en aparecer las compañías de seguros, que han creado sus propios gabinetes de investigación sobre el trabajo repetitivo y sus secuelas. Una empresa importante del sector en los Estados Unidos ha llegado a contratar 30 mujeres durante un mes para cumplir una singular tarea: cerrar las manos una vez cada cuatro segundos sobre un mango durante siete horas diarias.

Los detractores del sistema de trabajo japonés suelen citar la obra de Joseph y Suzy Fucini *Working for the Japanese* ("Trabajando para los japoneses"), publicada el año pasado. Denuncian allí una frecuencia de lesiones por trauma acumulativo superior a la normal en cierta empresa levantada en 1987. Y señalan que el sistema de producción obliga a mantener ocupados a los obreros 57 segundos de cada minuto.

En casi todos los países son las líneas de montaje de las empresas automovilísticas las que se ven instadas a echar el freno y a dialogar con los sindicatos las condiciones laborales. Pero otros muchos sectores tienen puesta la directa en el mismo sentido.

Vuelo ligero y luminoso

Los cables de algunos aviones comerciales modernos, si se estiraran en línea recta, llegarían desde

Madrid hasta Valencia. Pero al mismo tiempo que guían, en doble sentido, los mensajes de control desde la carlinga hasta los ordenadores de control de vuelo, los conductores de cobre desempeñan a veces un papel menos deseable. Se están convirtiendo en las antenas dominantes en esos aviones.

El peligro que encierran los rayos, el radar o los radiotransmisores obliga a un aislamiento perfecto del cableado, lo que supone una recarga notable sobre el peso del avión. Las nuevas estructuras han comenzado también a incorporar materiales compuestos que eliminan la barrera natural que la estructura metálica de antaño oponía a la siempre amenazadora interferencia electromagnética (IEM).

De ahí que veamos ahora a los ingenieros de sistemas electrónicos para la aviación enfrascados en el desarrollo de nuevos sistemas de control: los de vuelo luminoso. En éstos, las fibras ópticas se convertirán en la herramienta de control de los dispositivos electrónicos repartidos por todo el avión, aligerando el peso y el cableado hasta en un 50 por ciento.

Detrás de ese cambio se encuentra el ejército. En efecto, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos se dio cuenta cabal de las posibilidades de una tormenta electromagnética sobre un campo de operaciones en los años setenta, cuando encargó el diseño del YC-14, prototipo Boeing de despegue y aterrizaje cortos que nunca entraría en producción. Este avión de transporte conectaba los ordenadores de a bordo con cables de fibra óptica.

La susceptibilidad a la IEM ha puesto ya en la picota a un helicóptero del ejército norteamericano. En 1988, éste ordenó que se reforzara el blindaje del Halcón Negro, prototipo fabricado por Sikorsky Aircraft. Ocurrió ello después de que el pedal del rotor de cola se agarrotara cuando la aeronave pasaba sobre un radiotransmisor en Alemania, lo que levantó cierta polvareda periodística que atribuía a dicha interferencia varios desastres sufridos por el modelo.

La expresión vuelo luminoso se reserva a la red de sensores y actuadores que reciben señales ópticas de un ordenador de control de vuelo a bordo para alterar la posición de un alerón o timón. ("Vuelo por cable" designa al predecesor electrónico de los sistemas de fibra óptica.)

En el vuelo luminoso, o por luz, los sensores ópticos del ala o la cola del avión registran la posición de la aleta o el timón, y los de los motores comprueban la temperatura, abertura de gas u otro parámetro. Cuando una superficie de control de vuelo, por ejemplo el timón, se mueve, también lo hace el sensor, que cambia la amplitud u otra característica de una señal óptica generada por un transmisor en el fuselaje y conducida por la fibra. Esta información se envía hacia los instrumentos de la carlinga, o la procesa el ordenador de control de vuelo para ajustar automáticamente la posición de las superficies en las alas o la cola.

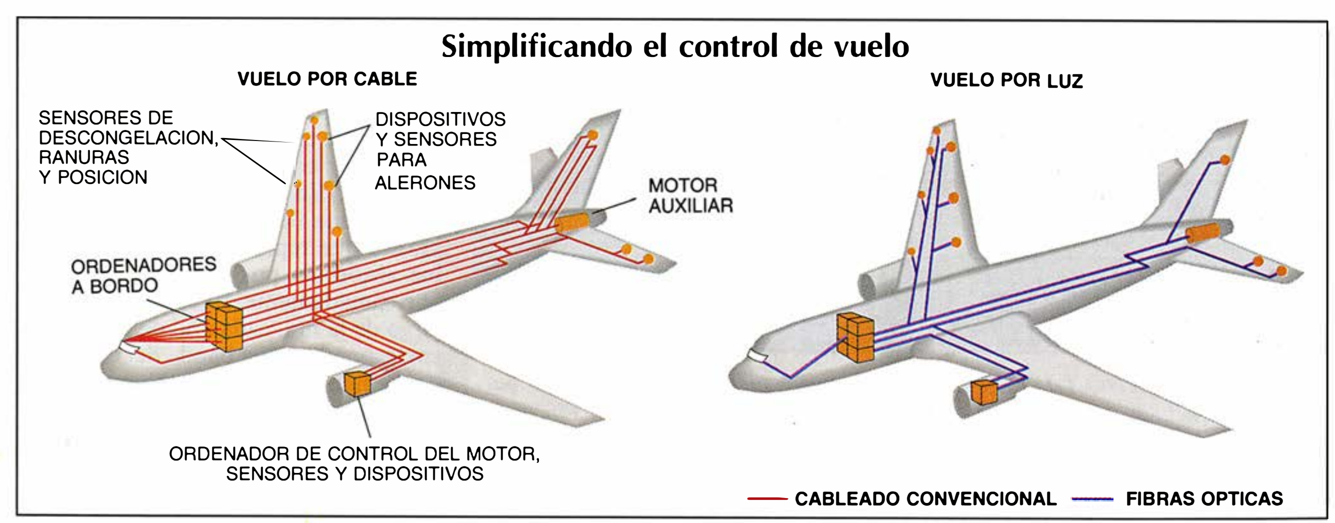
Pese a su atractivo, la técnica de vuelo luminoso no ha pasado de la fase de prototipo. La prueba más completa de vuelo controlado por luz se realizó en un Halcón Negro trucado: el Halcón Luminoso. Boeing proyectó y construyó el sistema –llamado Sistema Avanzado de Control Optico Digital (ADOCS)– para el ejército a mediados de los años ochenta.

Aunque Halcón Luminoso realizó más de 500 horas de vuelo experimental, el programa puso de manifiesto las dificultades de fiabilidad y fabricación, no resueltas todavía: coste elevado de los componentes, pérdida de señal por torsión de la fibra, fallo de los diodos láser usados en las unidades transmisoras y contaminación de los sensores.

La integración de sensores fácilmente reproducibles en un reactor de caza es el actual empeño del Centro de Investigación Lewis de la NASA en Hampton y de la armada. La "integración de sistema de control por fibra óptica", así se llama el programa, habrá de desarrollar sensores de posición, velocidad, temperatura, propulsión y presión para los cazas F18, avión que poseen varios ejércitos occidentales.

Se necesita prestar mayor atención a las fuentes de luz para los transmisores de señales ópticas hacia los sensores. Los láseres no suelen tolerar el intenso calor generado por los motores y el vuelo supersónico sin enfriamiento externo; lo que ha obligado a usar diodos emisores de luz menos potentes. El centro de investigación que la empresa norteamericana Boeing posee en Seattle ha iniciado las pruebas de un láser de arseniuro de galio e indio capaz de soportar las temperaturas de vuelo; podría gobernar varios sensores a la vez.

Dominada la técnica de los sensores, habrá que encauzar la investigación hacia la búsqueda de componentes ópticos que sustituyan el control eléctrico de los dispositivos hidráulicos que mueven aletas, timones y otras superficies de control del vuelo. Se ha desarrollado ya un dispositivo que, valiéndose de una señal óptica, calienta una pequeña cantidad de fluido hidráulico. La leve presión generada por el calentamiento del fluido es amplificada por el sistema hidráulico del dispositivo y sirve para mover una aleta o una superficie de cola.



FUENTE: *United Technologies Research Center*

Con el tiempo, las fibras ópticas podrían crear un sistema de autodiagnóstico para detectar problemas estructurales del avión en vuelo. Esas "pieles inteligentes" –construidas mediante sensores ópticos y fibras embutidas en una matriz de materiales compuestos– podrían detectar la presencia de grietas y otros signos de fatiga propios del uso o causados en combate. Los materiales compuestos permitirían construir el radar o el detector infrarrojo como parte integral del cuerpo del avión; la información se transmitiría a los ordenadores mediante enlaces de fibra óptica.

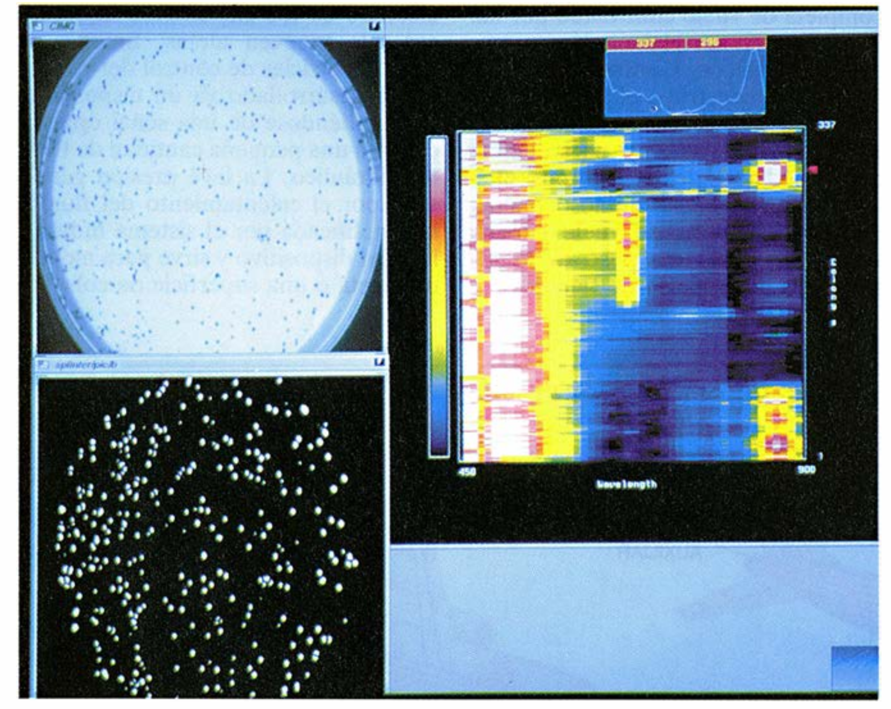
La NASA ha propuesto un programa, de unos 70 millones de dólares de coste y cinco años de duración, para coordinar el trabajo de los laboratorios industriales, universitarios y federales sobre aviones comerciales que vuelen por luz. Quiere, ni más ni menos, alcanzar la infraestructura técnica necesaria para el vuelo luminoso. Aunque deberá vencer ciertas reticencias, procedentes sobre todo del ejército.

La posibilidad real de comunicarse los ordenadores entre sí mediante fibras de alta capacidad refuerza el poder de la carlinga, donde los pilotos de caza reciben el bombardeo constante de datos de distinto origen. Las decenas de millones de bits que fluyen cada segundo por una red de fibras ópticas proporcionan una capacidad de comunicación suficiente para "fundir" fácilmente la información del infrarrojo, del radar y otras en una imagen única que se presenta ante el piloto. Imagen que se superpone a las coordenadas de posición de un mapa digital. Quizá no tarde el día en que veamos, en el hangar de mantenimiento, cómo un técnico enlaza una fibra a un interconectador óptico en el fuselaje.

Teledetección bacteriana

Los satélites espías usan la construcción espectral de imágenes para descubrir los camuflajes del enemigo. Otros equipos de teledetección la emplean para seguir la pista de contaminantes y localizar vetas minerales. Gracias a su capacidad de distinguir entre longitudes de onda de la radiación visible e infrarroja asociadas (a una duna de arena en el desierto o un carro de combate camuflado en kaki), la técnica da resultado.

No disponía de técnica similar para sus propósitos Douglas C. Youvan cuando, a principios de los ochenta, necesitaba identificar los componentes del pequeño mundo instalado en una placa de cultivo. La verdad es que apuntaba más lejos: acopiar datos sobre proteínas de un millón de cepas mutantes de bacterias fotosintéticas, cada una de las cuales podía, en principio, caracterizarse por un sello espectral distintivo.



1. EL PROCESADO DE IMAGENES de varios cientos de colonias de bacterias fotosintéticas mutantes en una cápsula de petri muestra la posición de las colonias de bacterias (partes superior e inferior izquierda). *Los datos espectrales* (derecha) *de cada colonia se representan en una fila* (indicada por la flecha roja) *dentro de una representación en color de la distribución de absorción. Sobre el mapa puede apreciarse una gráfica del espectro de absorción de la fila. Fuente: Douglas C. Youvan.*

Pero en aquel entonces el único instrumento disponible para captar el cuadro entero de una cápsula de petri era un espectrofotómetro de doble haz. Permitía analizar los rasgos espectrales del cultivo de bacterias fotosintéticas, proceso en el que se tardaba cinco días. Pero él necesitaba examinar cientos de colonias bacterianas distribuidas en el disco en un momento dado o debería acometer otra línea de investigación. La necesidad de Youvan creó el órgano: un espectrofotómetro de imagen digital.

Igual que el ojo humano, ese aparato combina la resolución espectral del espectrofotómetro con la resolución espacial de una cámara. A diferencia del ojo humano, no se ve condicionado por un limitado poder de resolución espectral. Youvan y sus dos asociados, Adam Akin y Mary M. Yang, usan una videocámara para registrar imágenes de hasta 500 colonias en una cápsula de petri. Un carrusel de diapositivas cambia los filtros de Fabry Perot en rápida sucesión para captar, en 10 minutos, hasta 500 imágenes espectrales distintas. Cada corte de 10 nanómetros recogido por la cámara filtrada se combina digitalmente para producir un cuadro de espectros de absorción a longitudes de onda desde el visible hasta el infrarrojo próximo.

No basta con hacer acopio de datos. Sin ulterior procesado, la información generada en un solo barrido ocuparía 40 megabytes de memoria. El grupo de Youvan empleó algoritmos de proceso de imágenes para segregar una superficie correspondiente a cada colonia bacteriana. Los valores espectrales de una colonia se calculan promediando los elementos de la imagen para cada región, dividiendo por 1000 la cantidad de datos a archivar.

Aparece entonces en la pantalla del ordenador un panel dividido en varias ventanas. En una de ellas, se puede colocar una flecha en una fila de una gráfica que representa la cantidad de luz absorbida por cada colonia. Los aproximadamente 50 segmentos a lo largo de la fila, cada uno de los cuales corresponde a una banda del espectro de 10 nanómetros de anchura, están coloreados para representar cuánta luz se ha absorbido. Otras ventanas muestran la disposición de las colonias en la cápsula o una gráfica del espectro compuesto de absorción para la totalidad de la fila.

La bacteria fotosintética que Youvan está estudiando *–Rhodobacter capsulatus–* contiene bacterioclorofila y carotenoides, pigmentos que absorben la luz en el dominio visible e infrarrojo próximo. Las diferentes características de absorción representan diversas estructuras de proteínas, lo que constituye un sello espectral de cada bacteria mutante. "Sabemos que si pudiéramos convertir en imagen millones de sucesos diferentes, ello equivaldría a lo que, en tiempo, recorre la evolución", dice Youvan. "La naturaleza tardaría muchísimo en crear y poner a prueba número tan alto de mutantes. Nosotros hemos acelerado efectivamente el reloj de las mutaciones."

Está además convencido de que su técnica sirve para observar otras cosas además de bacterias. Generalizando el dominio espectral del equipo, podría ayudar a discernir la eficacia de los microorganismos en la neutralización de contaminantes en biomedicación o identificar bacterias genéticamente manipuladas que sintetizan sustancias de acción terapéutica.

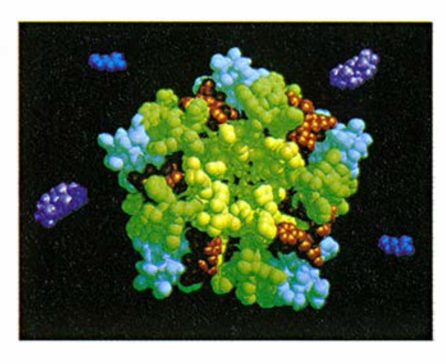
Canales abiertos

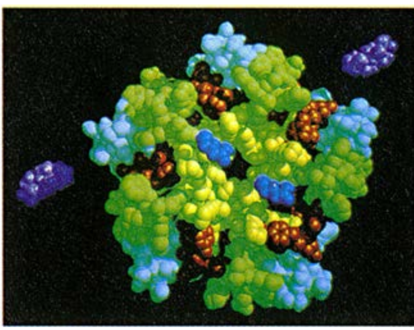
¿Cuándo una hormona sexual deja de serlo? En los años cincuenta, los investigadores observaron que las mujeres epilépticas sufrían menos ataques durante la menstruación, cuando caen los niveles de progesterona. Tardó treinta años en averiguarse la razón: cuando el organismo no necesita ya de la hormona, ésta se degrada en metabolitos que cumplen una misión distinta. Antes de diez minutos, la hormona sexual se convierte en esteroides que reducen la excitación nerviosa.

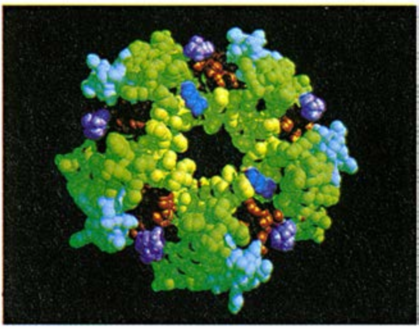
Los bioquímicos no advirtieron que se hallaban ante unos moduladores alostéricos naturales hasta 1987. Estas substancias que proceden de "otras partes" realzan la función del receptor nervioso al unirse al mismo en un sitio distinto de donde se acopla el neurotransmisor. El nuevo fármaco ha recibido el nombre comercial de epalón. La empresa que lo fabrica, dedicada a la biotecnología, espera que, creando a medida los compuestos para que encajan en subunidades específicas del receptor, podrá inducir respuestas neurológicas completamente diferentes.

Un modelo podría producir una "droga blanda" para aliviar la tensión e irritabilidad del síndrome premenstrual sin causar somnolencia. Otra versión podría inducir el sueño, y una tercera detener las convulsiones de la epilepsia.

Los compuestos de epalón se enlazan al complejo receptor del neurotransmisor GABA, que es uno más entre los muchos mensajeros químicos, dotado cada uno de su propio receptor en el sistema nervioso central. Distínguese aquél de la mayoría de los neurotransmisores (verbigracia, la serotonina y las catecolaminas) por su carácter inhibidor.







2. *MODELO MOLECULAR de un complejo receptor parcial de GABA, neurotransmisor inhibidor. Muestra* (arriba) *los canales de cloruro cerrados. Se abren éstos cuando el GABA* (azul) *se enlaza con el receptor en la membrana celular de una neurona* (centro). *Los derivados de la progesterona* (púrpura), *llamados compuestos epalón, se unen también al receptor* (abajo) *favoreciendo la apertura de los canales.*

Bajo estados psicológicos normales, GABA se enlaza a su receptor y abre así, brevemente, los canales de cloruro de la membrana celular. Los iones cloro, cargados negativamente, penetran en la neurona y relajan su tendencia a la excitación, que viene instada por el movimiento de los iones positivos. Este instante de tranquilidad –medido en milisegundos– devuelve a su estado normal las células, que pueden así funcionar de nuevo. Cuando los canales de cloruro se mantienen cerrados, aparecen sentimientos de ansiedad. Los ataques se producen cuando se cierran muchos canales en un número suficiente de regiones del cerebro.

Desde el descubrimiento de los GABA, los laboratorios farmacéuticos han iniciado la búsqueda de especies químicas que imiten su función a lo largo de un periodo prolongado. Las benzodiazepinas, antiespasmódicos, ayudan a los GABA a mantener canales abiertos ligando el complejo receptor. Así operan también los epalones, si bien parecen engarzarse en sitios distintos.

En 1986, Steven M. Paul y Maria D. Majewska, del Instituto Nacional de Salud Mental (NIHM), informaron ya que los derivados se unían –aunque sin notable intensidad– con los complejos receptores de GABA. Sospechaban, asimismo, que esos compuestos se comportaban como si fueran barbitúricos.

El resultado del trabajo no le pasó inadvertido a Kevin Gee, de la facultad de farmacia de la Universidad del Sur de California, que también trabajaba en receptores de GABA. Gee decidió averiguar qué ocurría con los metabolitos de la progesterona cuando se ofrecían al receptor junto con concentraciones fisiológicas del neurotrasmisor que actúa sobre dicho receptor. Confirmó que los derivados se ligaban al receptor; ahora, con mayor fuerza y en un punto distinto del conocido para los barbitúricos. Una rápida prueba con ratones confirmó la corazonada de Gee: los compuestos impedían las convulsiones. Solicitó patentes para los derivados en 1987.

Hay mucha investigación a realizar antes de que se puedan comercializar los epalones. De momento hay que determinar los pormenores del complejo receptor. Se han identificado cinco subunidades, designadas desde alfa hasta épsilon. Y se admite la probabilidad de que, según la región del cerebro, predomine una forma u otra del complejo receptor de GABA, cada una constituida por diferentes subunidades.

Probabilidad que alimenta el sueño de los laboratorios farmacéuticos. Un compuesto que ligue una combinación de subunidades prevaleciente en el cerebelo (que controla el movimiento muscular voluntario) podría producir efectos muy diferentes de un fármaco ideado para encajar en un conjunto de subunidades del tallo cerebral (que regula el ritmo cardíaco y la respiración).

Ondas de choque en el vacío del espacio

Con gran sorpresa de los teóricos, se forman ondas de choque incluso en el enrarecido medio interplanetario. Esas ondas esculpen el espacio y están en la raíz de muchos fenómenos astrofísicos

Roald Z. Sagdeev y Charles F. Kennel

Las ondas de choque resuenan por todo el sistema solar. Recuerdan la reverberación del estampido de un reactor supersónico, perturbación ésta causada por un choque aerodinámico, por un brusco cambio de las propiedades de un gas que se propaga más deprisa que el sonido. Se sabía, desde hacía tiempo, que, en un gas eléctricamente neutro, como la atmósfera terrestre, las partículas deben chocar para que se forme una onda. Pero ya en los años cincuenta los autores y sus colaboradores establecieron las razones teóricas por las que, frente a lo que cabía esperar, podrían formarse ondas de choque semejantes incluso en el cuasi-vacío del espacio exterior, donde las colisiones brillan por su extrema rareza. Si andábamos en lo cierto, las ondas de choque desempeñarían un papel importante en la conformación de los entornos espaciales.

Esas "ondas de choque sin choques" no pueden darse, de manera natural, en la Tierra, donde casi toda la materia está constituida por átomos y moléculas eléctricamente neutros. En el espacio, sin embargo, las altas temperaturas y la radiación ultravioleta de las estrellas muy calientes disocian los átomos en los núcleos y electrones componentes, para producir el plasma, una sopa de partículas dotadas de carga eléctrica. Los expertos en plasma avanzaron la hipótesis de que sus propiedades eléctricas y magnéticas, tomadas en conjunto, promoverían interacciones que harían las veces de colisiones y permitirían la formación de ondas de choque.

ROALD Z. SAGDEEV y CHARLES F. KENNEL comenzaron a trabajar juntos en el Centro Internacional de Física Teórica de Trieste en 1965. Sagdeev encabeza la división teórica del Instituto Soviético de Investigación Espacial y enseña en el Instituto Físico-Técnico de Moscú. Desde el año pasado pertenece también al departamento de física de la Universidad de Maryland en College Park. Ha intervenido en política armamentística, gestión científica y protección de la biosfera. Kennel es profesor de física en la Universidad de California en Los Angeles, además de asesor en una empresa dedicada a la experimentación sobre plasma en el espacio.

En 1964, el trabajo teórico halló su primera confirmación experimental. Norman F. Ness y su equipo, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA, detectaron, con los datos recogidos por el vehículo espacial *IMP-1*, signos claros de que, allí donde el viento solar se encontraba con el campo magnético terrestre, había una onda de choque sin choques. (El viento solar es una corriente continua de partículas cargadas que sale del Sol.) Las investigaciones posteriores demostrarían la aparición de ondas de choques sin colisión en una deslumbrante variedad de situaciones astronómicas. Se han descubierto en el viento solar a barlovento (hacia el Sol) de todos los planetas y cometas visitados por ingenios espaciales. Las violentas fulguraciones del Sol generan ondas de choque que se propagan hasta los confines del sistema solar; las tremendas explosiones galácticas crean perturbaciones en el medio intergaláctico que son billones de veces mayores. Además, muchos astrofísicos creen que las ondas de choque de las explosiones de supernova que se producen en nuestra galaxia aceleran los rayos cósmicos, flujo de partículas elementales y núcleos atómicos de extraordinaria energía que llueven sobre la Tierra desde todas las direcciones.

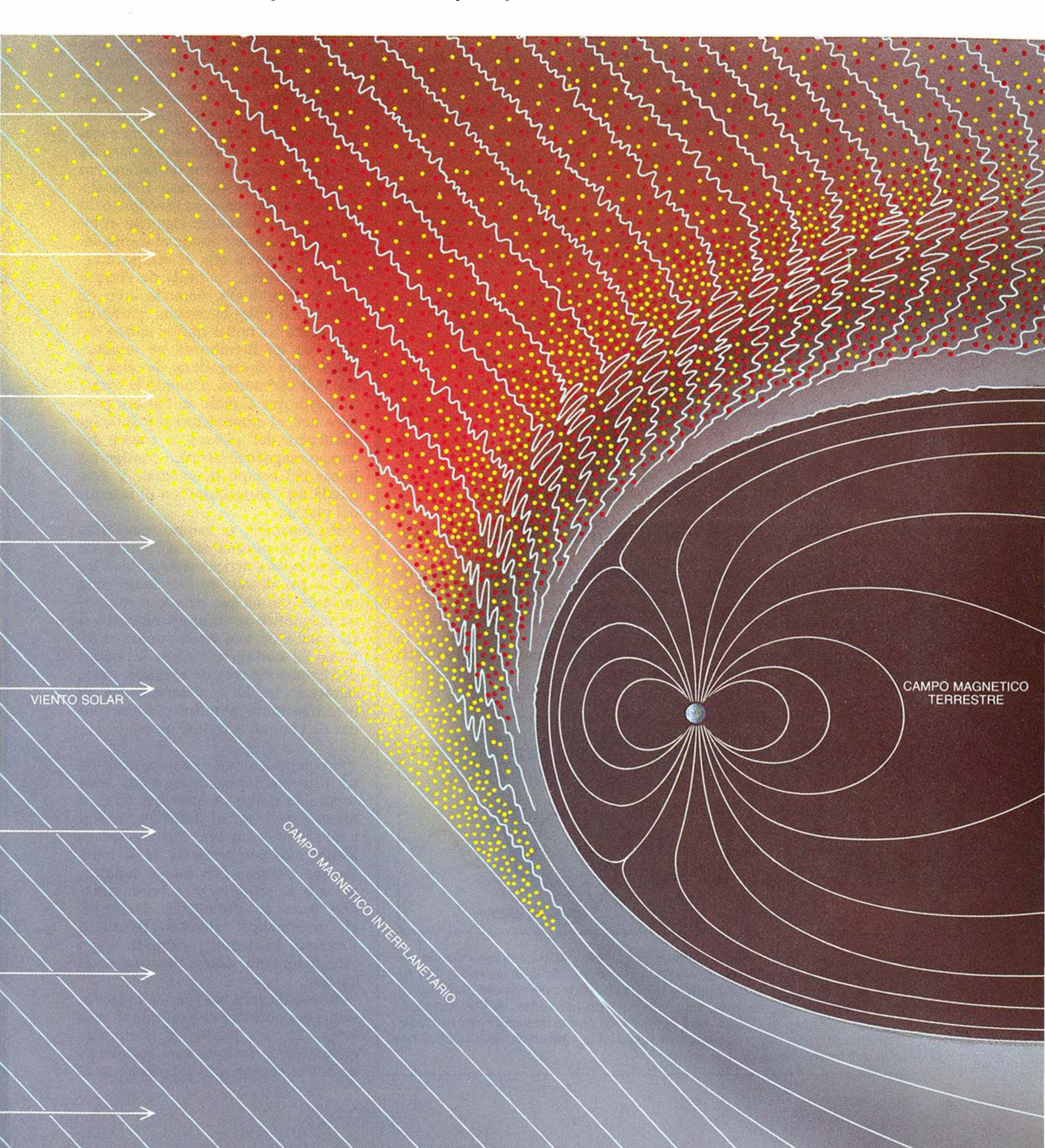
El estudio de los plasmas se inició en el siglo XIX, cuando Michael Faraday investigó las descargas eléctricas a través de gases. El trabajo moderno propiamente dicho arranca de 1957 y 1958. Durante esos años, los vehículos espaciales soviéticos *Sputnik* y los norteamericanos *Explorer* descubrieron que el plasma llenaba el espacio de la proximidad de la Tierra. Contemporáneamente, en la conferencia Atomos para la Paz que se celebró en Ginebra se revelaron investigaciones, hasta entonces secretas, sobre la fusión termonuclear controlada llevadas a cabo por los EE.UU., la Unión Soviética y Europa; con ello, la información libremente disponible sobre plasmas dio un gran paso adelante.

La investigación sobre la fusión se centra en producir plasmas extremadamente calientes y confinarlos en "botellas" magnéticas y, así, crear las condiciones necesarias para que tengan lugar reacciones nucleares que rindan energía. En 1957, buscando un método para calentar plasmas de fusión, uno de nosotros (Sagdeev) se dio cuenta de que una compresión magnética instantánea podía propagarse, sin colisionar, a través de un plasma, y hacerlo de manera muy parecida al movimiento seguido por una

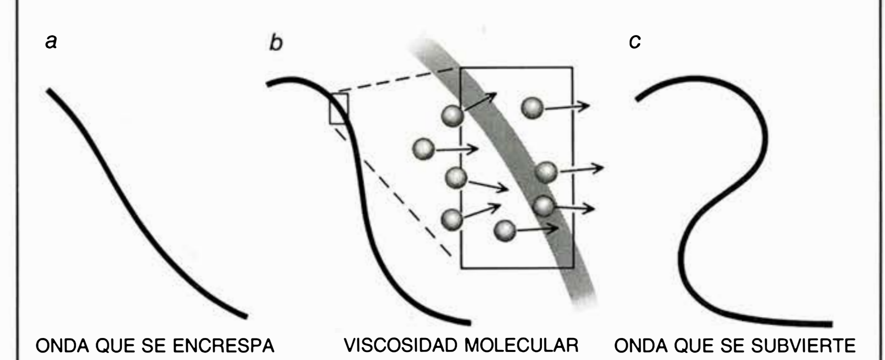
1. ONDAS DE CHOQUE SIN COLISIONES: se forman cuando el viento solar, corriente de partículas cargadas procedente del Sol, incide sobre el campo magnético de la Tierra. Los fenómenos que se producen dependen de la dirección del campo magnético interplanetario corriente arriba. En la zona cuasiparalela (*regiones superiores*) escapan, corriente arriba, electrones de alta energía (*sombreado amarillo*) y iones (*rojo*). Las partículas que escapan crean ondas microscópicas en el viento solar y ondas de Alfvén, que son perturbaciones magnéticas torsionales (*líneas onduladas*). El frente de choque es delgado allí donde es también cuasiperpendicular (*regiones inferiores*).

onda de choque a través de un fluido ordinario.

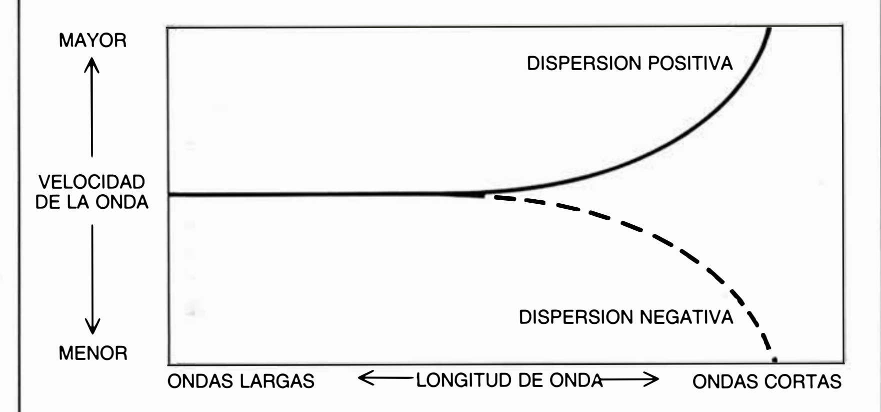
Los campos magnéticos que atraviesan los plasmas obligan a éstos a comportarse como si fueran esos fluidos. Un campo magnético ejerce una fuerza (la de Lorentz) sobre una partícula en movimiento dotada de carga eléctrica. Podríamos representar dicho campo mediante un conjunto de líneas de fuerza a través del plasma, esas mismas líneas de fuerza que rodean una barra imantada y se nos hacen visibles con las limaduras de hierro. La fuerza de Lorentz actúa siempre perpendicularmente a la dirección de la línea del campo y a la dirección en que la partícula se está moviendo. Si ésta se mueve perpendicularmente al campo, la fuerza actúa como una banda elástica, tirando hacia atrás de la partícula, y la obliga a moverse describiendo pequeñas circunferencias en torno a la línea del campo magnético. La partícula puede, sin embargo, moverse con libertad en la dirección de la línea del cam-



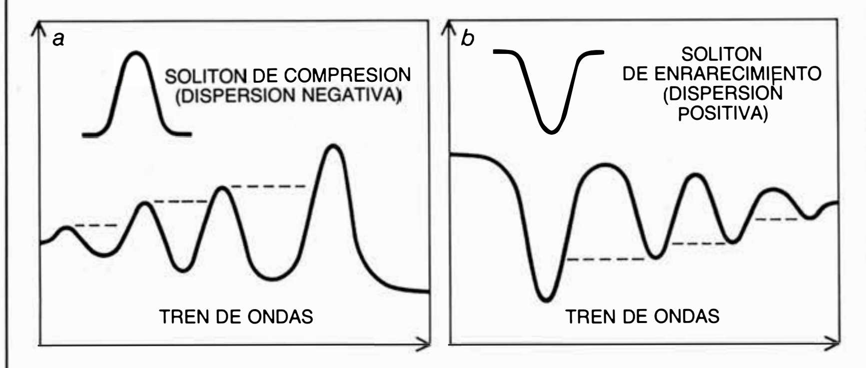
Así se forman las ondas de choque



Las ondas se encrespan porque las partes de mayor amplitud avanzan más deprisa. Con el tiempo, una onda (*a*) se hace más empinada y abrupta. En una onda sonora, las colisiones individuales entre moléculas de aire (viscosidad molecular) transfieren cantidad de movimiento hacia delante (*b*) e impiden que el frente de onda adelante a la materia que se mueve más lentamente y se halla corriente arriba. En las intensas ondas de choque sin choques, este proceso puede conducir a la subversión de la onda (*c*).



La dispersión ondulatoria impone que la velocidad de una onda dependa de su longitud. Este efecto adquiere interés en el caso de las ondas de choque sin choques de los plasmas (gases de electrones y núcleos sin corteza). La figura muestra que la velocidad de una onda puede aumentar (dispersión positiva) o disminuir (dispersión negativa) con longitudes de onda crecientes. La dispersión tiende a difuminar una onda bien definida, transformándola en la larga serie de los armónicos que la componen.



Las ondas solitarias, o solitones, se forman gracias a la acción opuesta del reforzamiento y la dispersión. Dependiendo del signo de la dispersión, los solitones pueden ser regiones de compresión (*a*) o latidos de enrarecimiento (*b*). Una sucesión ordenada de solitones, llamada tren de ondas, define el grosor de una onda de choque. La longitud del tren de ondas depende del mecanismo de amortiguación que merma la energía de los solitones hasta acabar por disiparlos en forma de calor.

po magnético. La combinación del movimiento libre a lo largo del campo con el limitado a rotaciones circulares a través del mismo convierte la trayectoria de la partícula en una hélice que se arrolla en torno a la línea de fuerza del campo magnético.

La fuerza de Lorentz se opone a la dispersión del plasma en la dirección perpendicular al campo magnético. La máxima distancia a lo largo de la cual pueden alejarse del campo magnético las partículas se denomina radio de Larmor, y es inversamente proporcional a la intensidad del campo. En el débil campo magnético interplanetario, el radio de Larmor viene a ser de varios kilómetros para los electrones y de cientos de kilómetros para iones de mayor masa. Estas distancias pueden parecer grandes, pero son diminutas comparadas con el tamaño de la región donde el viento solar se encuentra con el campo magnético terrestre. La onda de choque que se forma allí, llamada arco de choque, dibuja la misma parábola que crean las ondas que se apilan delante de un fueraborda en marcha. Tiene una envergadura de más de 100.000 kilómetros. Cuando la escala es mayor que el radio de Larmor para los iones, el movimiento global de las partículas del plasma a través del campo magnético arrastra consigo las líneas del campo magnético. Y éste queda así "congelado" en el interior del plasma.

En resumen, el campo magnético dota a un plasma sin colisiones de propiedades elásticas semejantes a las de un gas denso; de ese modo, una onda de plasma que atraviese un campo magnético se comportará como si se tratara de una onda sonora ordinaria. El análisis teórico de las ondas de choques sin choque se inició, pues, siguiendo las ideas desarrolladas en investigaciones anteriores sobre ondas de choque aerodinámicas.

Supongamos, por ejemplo, que una brusca compresión crea una onda sonora en el aire. Al moverse ésta, su forma —esto es, su perfil de presión y densidad— cambia. Por ser las regiones más comprimidas de la onda las que avanzan con mayor rapidez, la onda se refuerza y su borde anterior gana en definición. Debemos al matemático alemán Bernhard Riemann la demostración de cómo este fenómeno genera las ondas de choque.

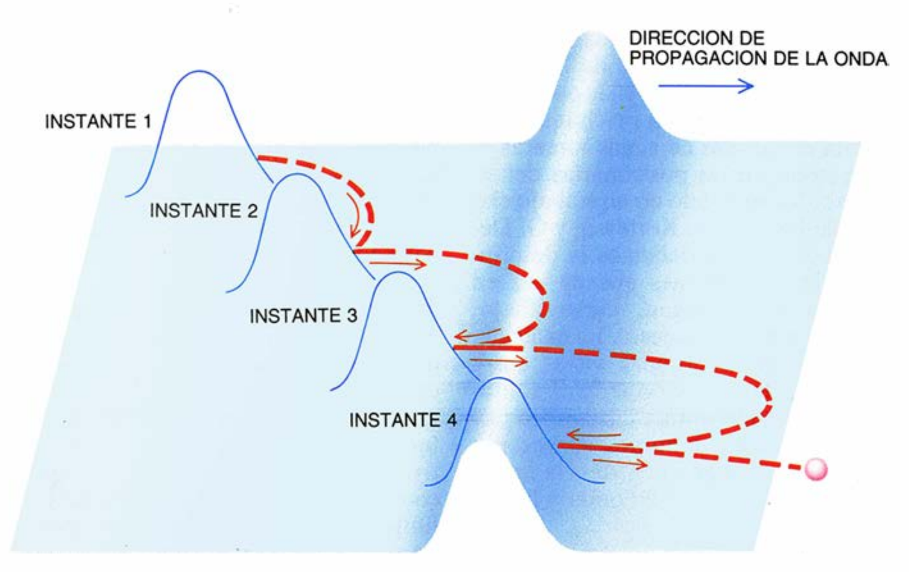
El aire de cola, más denso y rápido, acaba por alcanzar al aire frontal, más lento. En ese punto, el comportamiento de la onda sonora remeda el de la ola marina que avanza hacia la

costa, que se empina, rompe y se desintegra en espuma. Pero el clímax de la onda sonora no es ése exactamente. Cuando la onda se ha empinado tanto que está a punto de romper, las moléculas componentes intervienen en el transporte de cantidad de movimiento entre puntos vecinos en el gas: las de la región más rápida y densa de la onda corren hacia la cabecera de un frente de onda cada vez más cortante, y en esa carrera colisionan con las moléculas de la región frontal, más lenta, e intercambian cantidad de movimiento con ellas. Así, las moléculas más lentas alcanzan también la velocidad de la onda en movimiento.

El intercambio de cantidad de movimiento viene forzado por la viscosidad molecular. En este proceso, la cresta de la onda que avanza entrega cantidad de movimiento a la región imperturbada que le antecede, como si fuera la cesión del testigo en una carrera de relevos. La viscosidad molecular opera con eficacia cuando el grueso del frente de onda se reduce hasta el valor de la distancia media que puede recorrer una partícula antes de chocar con otra, distancia conocida como recorrido libre medio. (El recorrido libre medio de una molécula en el aire vale aproximadamente una diezmilésima de centímetro.) Para este grueso, densidad y viscosidad se equilibran entre sí y se forma una onda de choque permanente. Esta da por resultado una variación brusca, casi un escalón, de la densidad, la velocidad y la presión del gas.

Antes de que los físicos conocieran ningún mecanismo capaz de sustituir, en los plasmas, a la viscosidad molecular, carecía de sentido hablar de ondas de choque sin choques. El tema se dejó de lado durante muchos años. Hasta que, a finales de los años cincuenta, uno de nosotros (Sagdeev) e, independientemente, Arthur R. Kantrowitz y Harry E. Petschek, que trabajaban en el laboratorio de investigación Avco-Everett, sito cerca de Boston, sugirieron que en un plasma tenue podía darse una transmisión similar de cantidad de movimiento. Adujeron las razones teóricas de por qué en un plasma el testigo no lo pasan las partículas, sino las ondas.

La carrera de relevos del plasma depende del efecto de dispersión, así se llama el hecho de que la velocidad de una onda de plasma cambie con la longitud de onda. Mientras que en los gases ordinarios la velocidad de una onda sonora es prácticamente independiente de su longitud, en el plasma, donde no hay choques, la onda es muy dispersiva. Es decir, su velocidad aumenta o disminuye al acortarse su longitud de onda, dependiendo del ángulo entre la dirección de propagación de la onda y la orientación del campo magnético.



2. SE PRODUCE AMORTIGUACION DE LAS ONDAS cuando la energía pasa de los solitones a las partículas cargadas (electrones o iones) del plasma. Las partículas que se mueven, más o menos, a la velocidad del plasma interaccionan fuertemente con los solitones. Los campos eléctricos de éstos obligan a las partículas resonantes a detenerse y volver hacia atrás, con pérdida de energía por parte de los solitones y su transferencia a las partículas. La fuerza magnética de restitución (fuerza de Lorentz) incurva la trayectoria de cada partícula, haciéndola volver una y otra vez al mismo solitón. Cada encuentro refuerza la energía de la partícula a expensas de la que posee el propio solitón.

De acuerdo con el teorema de Fourier, fundamental en matemáticas, cualquier perfil de onda consta de muchas ondas superpuestas, o armónicos, de distintas longitudes de onda. (Por analogía, la luz blanca está compuesta de muchos colores diferentes, cada uno de una longitud de onda distinta.) Si el perfil de onda se empina, excita armónicos de longitudes de onda todavía más cortas.

En el caso de la propagación de una onda que no coincida con la perpendicular al campo magnético, la dispersión provoca que los armónicos de longitud de onda más corta se propaguen más deprisa que los de longitudes de onda mayores (dispersión negativa). Los efectos de la dispersión se hacen apreciables cuando una onda de choque que se está reforzando adquiere el grosor aproximado del radio de Larmor para iones. En este momento, los armónicos de menores longitudes de onda adelantan al frente alcanzando, corriente arriba, el plasma sin perturbar. Estos armónicos transportan cantidad de movimiento, como las moléculas rápidas en la onda sonora.

Las acciones antagónicas de reforzamiento y dispersión dan por resultado una serie de impulsos ondulatorios que se propagan en la dirección de la onda de choque. En virtud de ello, el frente adquiere la forma de un "tren de ondas". Las ondas más débiles (las de menor amplitud) anuncian la llegada del tren, y sucesivamente se crean oscilaciones cada vez más fuertes hasta que se produce la transición a la verdadera onda de choque. La longitud del tren (en otras palabras, el grosor del frente de choque) dependerá de la rapidez con que se disipe la energía de las ondas.

En lo que respecta a las ondas que se propagan perpendicularmente al campo magnético, la dispersión determina que la velocidad de los armónicos disminuya a medida que se va acortando la longitud de onda. Los armónicos de longitud de onda menor corren ahora detrás del frente de choque; no pueden, pues, intervenir en la intensificación general de la onda. En este caso, la onda de choque pasa el testigo de cantidad de movimiento a una serie de impulsos de compresión llamados solitones.

Los solitones de las ondas de choque perpendiculares tienen aproximadamente el grosor del radio de Larmor para un electrón; se forman cuando el perfil de la onda se empina hasta esa escala. El frente que se va aguzando radia una secuencia ordenada de solitones, encabezados por el mayor (máxima amplitud) y seguido por otros de tamaño decreciente que terminan por integrarse en el estado imperturbado reinante detrás de la onda de choque. La longitud del tren de solitones depende de la rapidez con que la energía del solitón se disipa en forma de calor.

Hay una estrecha afinidad de comportamiento en las olas de la superficie de aguas someras y las ondas dispersivas de un plasma sin choques. La teoría de las olas en aguas someras se desarrolló en las postrimerías del siglo XIX, culminando en un trabajo clásico de Diederik J. Korteweg y G. De-Vries, a quienes debemos la descripción de los solitones que de vez en cuando se propagan, curso abajo, en los canales holandeses. La analogía, inapreciable a primera vista, entre solitones de aguas someras y solitones del plasma expresa una verdad física general: los solitones aparecerán siempre que pugnen entre sí la intensificación del frente de onda y la dispersión.

Una consecuencia de eso es que los solitones se forman incluso en ondas de choque que no se propagan exactamente perpendiculares al campo magnético. Los trenes de ondas antes mencionados pueden considerarse también solitones, con la salvedad de que los tales serán de rarefacción (baja densidad), no de compresión. En este caso, los armónicos de corta longitud de onda viajan con relativa lentitud (dispersión positiva), y cuanto mayor sea la amplitud del solitón rarefactivo, más despacio se propagará. Como resultado, el tren de ondas termina con el solitón más fuerte. En un estanque, la tensión superficial crea olas que tienen dispersión positiva y solitones de enrarecimiento. La hidrodinámica de superficies ofrece, pues, puntos de similaridad con las dos clases de dispersión halladas en un plasma sin colisiones.

La teoría de los solitones constituye, en su sobriedad, un impresionante logro de la moderna física matemática. En 1967, Martin Kruskal y sus colaboradores, de la Universidad de Princeton, demostraron que cualquier perfil de onda, en un medio dispersivo, capaz de experimentar intensificación (encresparse) evolucionaba hacia una sucesión de solitones. Relacionando la teoría del solitón con el problema de los choques de partículas elementales, que se ha estudiado a fondo en física cuántica desde los años veinte, demostraron que los solitones conservaban su identidad en la colisión, lo mismo que las partículas.

El conocimiento de las ondas de choque dispersivas seguirá siendo incompleto mientras no se sepa cómo se disipa en forma de calor la energía de las ondas o solitones. Si no fuera por el efecto de la disipación, el tren de estructuras ondulatorias que constituye la onda de choque sería infinitamente largo. En efecto, la cuestión fundamental de cómo las ondas de choque sin colisión transportan energía y cantidad de movimiento ha reaparecido, ahora bajo un nuevo aspecto.

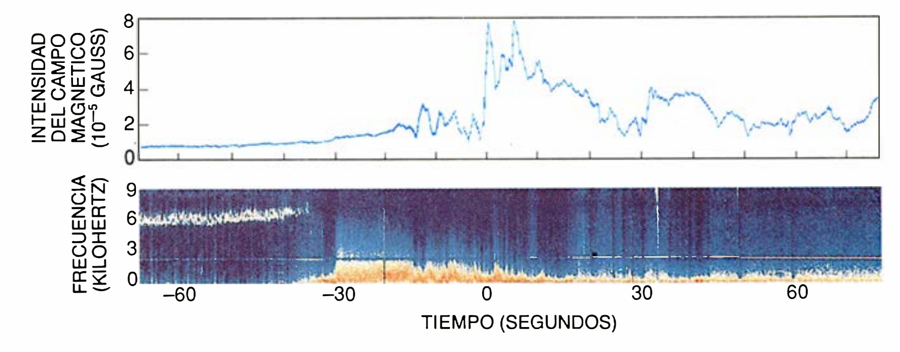
En 1945, el físico ruso Lev D. Landau descubrió un mecanismo de disipación que no requería choques entre partículas. Entre las partículas que se mueven al azar en un plasma, unas, pocas lo hacen a una velocidad comparable con la de la onda de plasma. Se dice que esas partículas están en resonancia con la onda. Entre una onda y las partículas resonantes con ella puede producirse un intenso intercambio de energía.

A principios del decenio de los setenta, uno de nosotros (Sagdeev) y Vitaly Shapiro, también del Instituto de Investigación Espacial de Moscú, demostraron que el mecanismo de Landau amortiguaba los solitones al acelerar los iones resonantes. Considérese, por ejemplo, un tren de solitones de compresión que se propaga perpendicularmente al campo magnético. Cada solitón genera un campo eléctrico paralelo a su dirección de movimiento. Los iones que se mueven a velocidades próximas a la de resonancia avanzan, comparados con los solitones, de una manera lenta; basta el campo eléctrico del solitón para detener e invertir el movimiento de esos iones. El solitón pierde parte de su energía, cediéndola a los iones resonantes con él, durante la interacción.

El proceso no se acaba aquí porque la fuerza magnética de Lorentz incurva la trayectoria del ion reflejado, de modo que vuelve una y otra vez al mismo solitón. Cada encuentro añade energía a la partícula. La fuerza de Lorentz, que crece con la velocidad de la partícula, acaba por lanzar el ion por encima de la cumbre del primer solitón. La aceleración continúa al encontrar el ion los restantes solitones del tren de ondas. Los iones resonantes ganan energía, cual si fueran practicantes de *surf* a lomos de olas marinas. Analogía que inspiró a John M. Dawson, de la Universidad de California en Los Angeles, el proyecto de una nueva clase de acelerador de partículas cargadas: el surfatrón.

El calentamiento de los iones por los solitones puede desencadenar un frente de choque si el número de iones en resonancia es suficiente. Eso se produce cuando los iones están calientes. Si no es ése el caso, los solitones encuentran otra manera de disipar energía: ellos mismos generan microscópicas ondas de plasma que lo calientan. Los electrones del plasma fluyen sobre los iones, creando así la corriente eléctrica responsable del característico perfil del campo magnético de los solitones. Si los iones están fríos, los electrones pueden moverse fácilmente a velocidades supersónicas respecto a los iones, en cuyo caso aquéllos amplifican las ondas acústicas iónicas, unas oscilaciones del campo eléctrico de escala pequeñísima. Estas ondas, que no afectan al campo magnético, crecen como una avalancha. Las partículas del plasma chocan no entre sí, sino con esas ondas acústicas iónicas. Después de desarrollarse las ondas, el plasma entra en un estado microturbulento.

En 1968, Robert W. Fredericks y sus colaboradores, de la empresa TRW de Los Angeles, detectaron ondas acústicas iónicas en los frentes de choque. A ese descubrimiento llegaron sirviéndose de los instrumentos instalados a bordo del vehículo espacial *OGO-5* y proyectados especialmente para estudiar ondas de plasma en el espacio. Desde entonces se han incluido detectores de ondas de plasma en la mayoría de las misiones espaciales dedicadas a plasmas del sistema solar, en particular los *Exploradores Internacionales Tierra-Sol* (*ISEE 1*, *2* y *3*) en órbita terrestre y



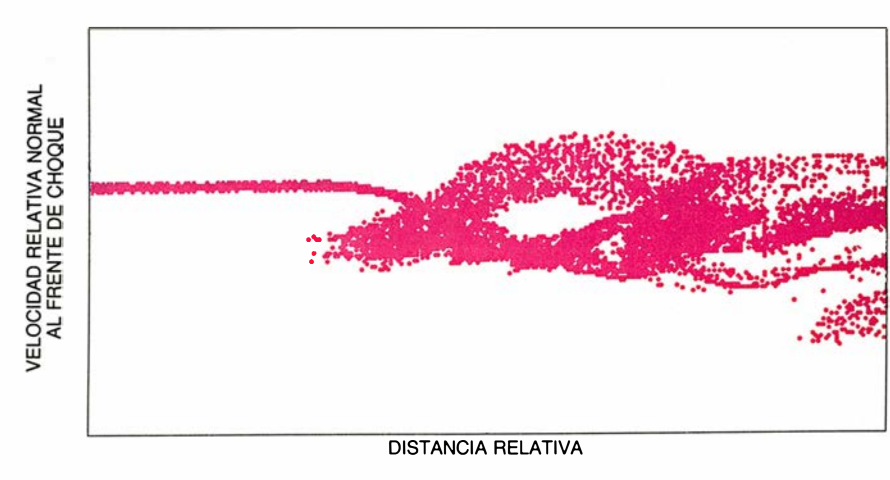
3. OSCILACIONES MAGNETICAS (*arriba*) registradas por el *Voyager 1* al cruzar la onda de choque sin colisión en el viento solar, delante de Júpiter. La región que venimos llamando corriente arriba está a la izquierda. Las perturbaciones magnéticas que preceden al frente de choque se debían a los iones reflejados y devueltos nuevamente al viento solar. Las medidas de las microscópicas ondas del plasma (*abajo*) mostraron que los iones reflejados creaban ondas acústicas iónicas de baja frecuencia. Los electrones calentados por las ondas iónicas escapaban corriente arriba, generando oscilaciones electrónicas de frecuencia más alta.

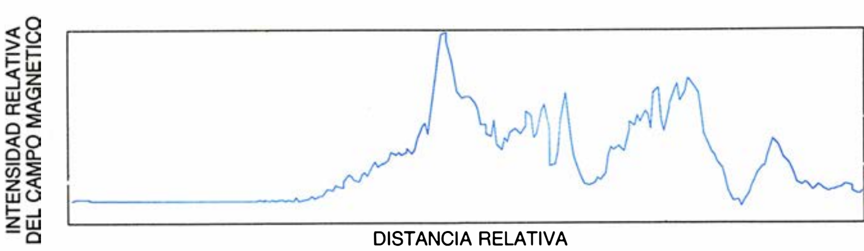
las misiones *Voyager 1* y *2* a los planetas exteriores. Fred Scarf y sus colaboradores, de TRW, solían pasar los registros de los campos eléctricos microturbulentos obtenidos por los vehículos *ISEE* y *Voyager* a través de un altavoz. Para la mayoría de los oyentes, la onda de choque era burda cacofonía; a nuestros oídos, sin embargo, constituía una sinfonía del espacio.

Aunque fácil de registrar, la microturbulencia se ha resistido a nuestra comprensión. Los teóricos recurrieron a cálculos numéricos para mejor entender el comportamiento de un plasma intensamente microturbulento. Resolviendo millones de ecuaciones del movimiento para las partículas, la simulación de ordenador nos recrea la forma en que las ondas acústicas iónicas se desarrollan y calientan el plasma. Los superordenadores están echando una mano a los astrofísicos para empezar a desentrañar las múltiples clases existentes de microturbulencia.

No hemos de esperar a conocer la naturaleza pormenorizada del plasma microturbulento, para inferir su comportamiento general. Los electrones del plasma ceden su cantidad de movimiento a las ondas acústicas iónicas, que a su vez la ceden a los iones. Este proceso retarda el movimiento de los electrones y genera resistencia a la corriente eléctrica. En algunos frentes de choque, la resistencia de las ondas acústicas iónicas adquiere entidad suficiente para impedir la creación de solitones. Cuando esto sucede, no se forman trenes de ondas; la onda de choque se llama entonces resistiva.

En el espacio se ha encontrado ambos tipos de ondas de choque: dispersivas y resistivas. Pero la mayoría de las observadas muestran características enteramente diferentes de las explicadas hasta ahora. La mayoría de ellas poseen potencia suficiente para que ni la dispersión ni la resistencia impidan que su encrespamiento acabe rompiendo la propia onda. Rompimiento que conduciría a nuevos fenómenos de choque.





4. SIMULACION POR ORDENADOR que aclara el comportamiento de los iones en la onda de choque joviana (*arriba*). Cada punto representa una partícula con una determinada posición y velocidad, en un instante dado y en una onda de choque que se encrespa, rompe y se subvierte. Los chorros de iones del "viento solar" (*a la izquierda*) se reflejan en el frente de choque, mientras que los más alejados, corriente abajo (*derecha*), se mueven caóticamente. El pico sobresaliente y las oscilaciones subsiguientes del campo magnético que se ven en la simulación (*abajo*) se parecen a los de la onda de choque real. Denis Papadopoulos y Peter Cargill, adscritos a la Universidad de Maryland en College Park, llevaron a cabo la simulación informática.

El ejemplo de las olas de aguas someras puede ayudar, una vez más, a ilustrar el proceso de rompimiento de ondas. Cuando una ola marina de aguas someras se ha amplificado bastante, la cima de su cresta se dobla hacia adelante en arco y termina por caer bajo la acción de la gravedad. La corriente de agua situada detrás de la cresta se desploma al mismo tiempo que la que le precede y origina crestas de espuma. Así, una gran ola que corre hacia la playa repetidamente rompe sobre sí misma (se subvierte).

Las ondas de plasma desarrollan también, cuando rompen, corrientes con velocidades superpuestas. La corriente más rápida, que procede de la cresta de la ola, invade el plasma situado delante del frente de choque. La fuerza de Lorentz devuelve, hacia el frente, los iones de esta corriente. Así reflejados, estos iones acaban por mezclarse con los que hay detrás del frente. Si éste es débil, su estructura no se resentirá; si es fuerte, la reflexión de los iones retardará transitoriamente su encrespamiento. No pasará, sin embargo, mucho tiempo sin que el frente se refuerce y se repita el ciclo. Simulaciones numéricas recientes realizadas por Kevin B. Quest y sus colaboradores, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, confirman la hipótesis según la cual las ondas de choque muy intensas constan de ciclos sucesivos de encrespamiento, rompimiento y reflexión de iones.

Las interacciones entre los iones reflejados y los que forman parte de la corriente pueden desembocar también en microturbulencia. El *Voyager* detectó ondas acústicas iónicas, esta vez generadas por iones reflejados en el arco de Júpiter. En la vecindad de la Tierra, los iones reflejados generan ondas en el viento solar, a una frecuencia media geométrica de la de rotación de los iones y de los electrones alrededor del campo magnético terrestre; esta media se llama frecuencia de baja resonancia híbrida. En 1985, el *Intershock*, vehículo espacial soviético-checo, realizó las primeras medidas precisas de baja turbulencia híbrida en el arco de choque de la Tierra. Alrededor de ambos planetas, las ondas acústicas iónicas toman energía de los iones y la ceden a los electrones. Algunos electrones calentados escapan hacia delante, para penetrar en la corriente del viento solar; otros regresan a la zona de la onda de choque.

Hasta ahora nos hemos centrado en las ondas de choque que se propagan más o menos normalmente al campo magnético: ondas cuasiperpendiculares. Pero la turbulencia del plasma cobra mayor interés cuando las ondas se propagan paralelamente al campo magnético. Este ya no frena a las partículas que corren delante de un frente de choque cuasiparalelo. Y las partículas se convierten en fuente importante de inestabilidad turbulenta.

La capacidad del campo magnético para canalizar el movimiento de las partículas a lo largo de las líneas de fuerza nos evoca otra imagen: la de la manguera de riego que se deja suelta en el suelo mientras arroja agua a

presión. Las "eses" de la manguera se acentúan con la fuerza centrífuga del agua que corre por su interior; con el tiempo, la manguera serpentea incontrolablemente en el suelo.

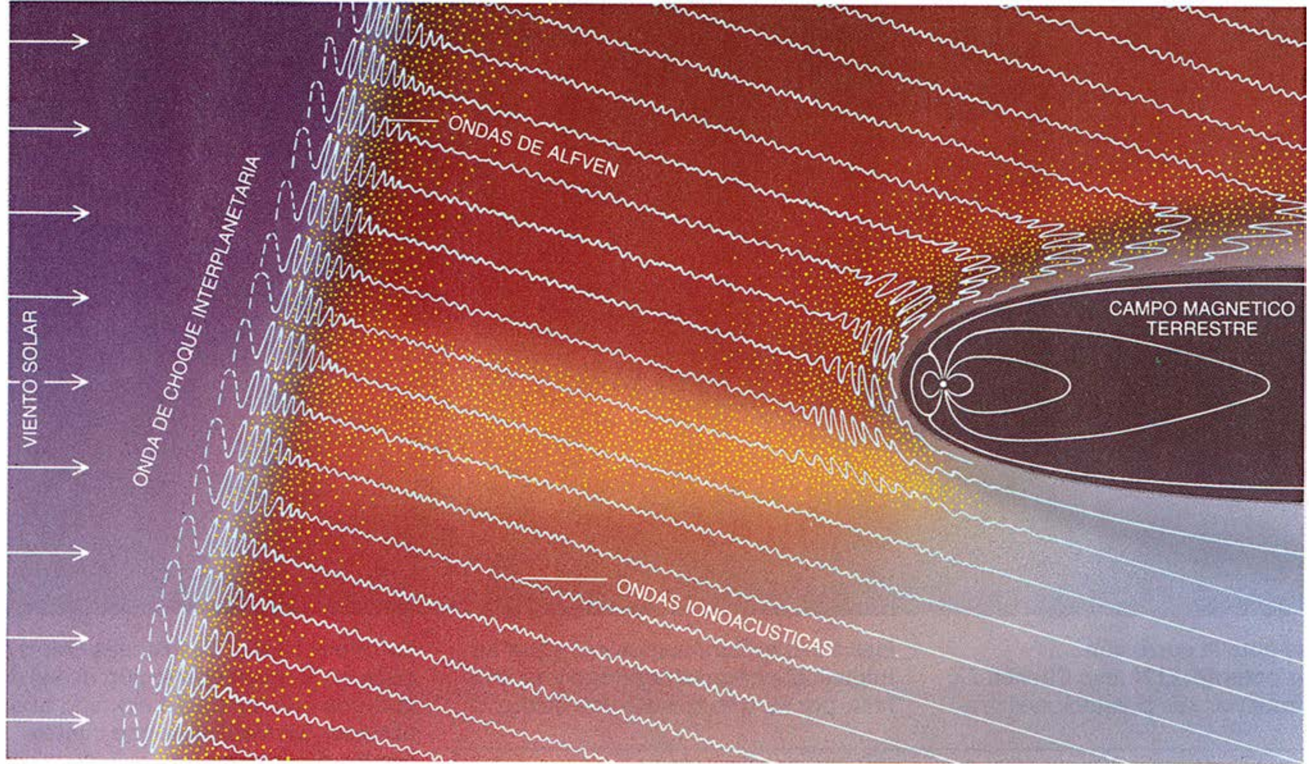
El campo magnético que canaliza las corrientes de plasma superpuestas delante de un frente de choque cuasiparalelo experimenta una inestabilidad semejante, hasta el punto de que se la conoce por inestabilidad de manguera de riego. La fuerza centrífuga que incurva las líneas del campo magnético es proporcional a la densidad de energía del movimiento del plasma en el campo magnético. La inestabilidad se produce cuando esta densidad de energía excede la de dicho campo. A muchos físicos se les ocurrió por separado la imagen de la inestabilidad de manguera, pero la versión avanzada en 1961 por Eugene N. Parker, de la Universidad de Chicago, se ideó específicamente para los frentes de choque cuasiparalelos.

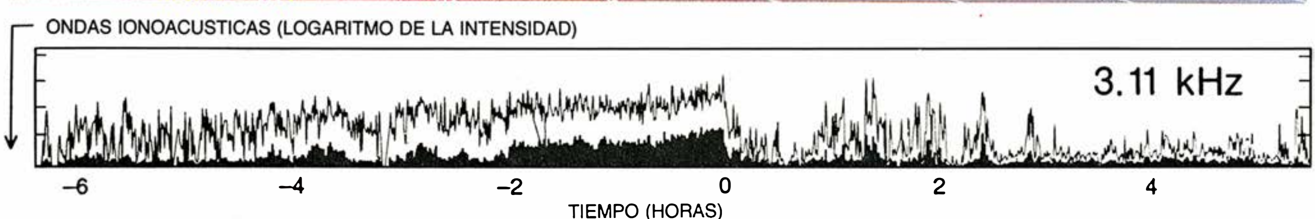
La inestabilidad de manguera en el plasma conduce a una deformación aleatoria de las líneas de fuerza del campo magnético. Esta clase de turbulencia magnética constituye un conjunto caótico de "ondas de torsión", es decir, ondas que retuercen las líneas del campo. Se las llama ondas de Alfvén, en honor de Hannes Alfvén, del Real Instituto de Tecnología de Estocolmo, su primer expositor.

Lo mismo que las acústicas iónicas, las ondas de Alfvén intercambian energía y cantidad de movimiento con los iones en resonancia con ellas. En lo que respecta a los iones, su interacción con las ondas de Alfvén imita el efecto de los choques; así, éstas ponen un límite a la penetración corriente arriba de los iones que escapan del frente de choque, y determinan el grosor del frente de choque cuasiparalelo.

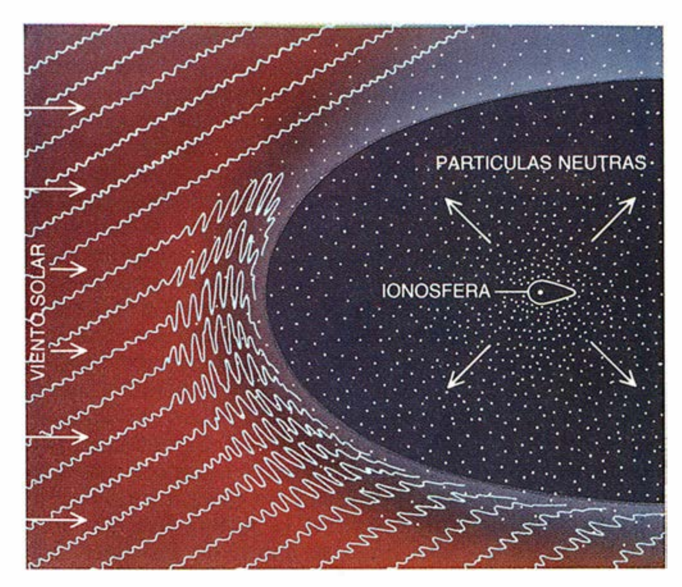
Predice la teoría que las colisiones entre iones y ondas de Alfvén sean cuasielásticas; esto es, impliquen sólo ligeras variaciones de energía pese al notable intercambio de cantidad de movimiento: pensemos en la imagen de una pelota de goma que rebote contra una pared dura, cuya cantidad de movimiento se invierte sin alterar esencialmente su energía. Como resultado, la turbulencia del Alfvén en el interior del frente de choque debe desintegrarse con relativa lentitud. Esta idea nos indujo a concluir, en 1967, que los frentes de choque cuasiparalelos podrían ser mucho más gruesos que los cuasiperpendiculares.

Las primeras mediciones del arco de choque de la Tierra por el vehículo espacial *IMP-1* insinuaron la existencia de grandes diferencias entre ondas de choque paralelas y perpendiculares. Los datos enviados por el *IMP-1* causaron al principio cierta confusión: unas veces el frente de choque aparecía delgado y otras grueso. Tres años más tarde sugerimos que la estructura del frente dependería de la orientación del campo magnético interplanetario. En 1971, Eugene W. Greenstadt y sus colabo-





5. UNA ONDA DE CHOQUE INTERPLANETARIA comienza con una erupción solar y se propaga a lo largo de miles de millones de kilómetros a través del viento solar. Los instrumentos instalados a bordo de la nave espacial *ISEE-3* midieron el paso de una gran onda de choque interplanetaria y cuasiparalela instantes antes de que barriera la Tierra. Las características del arco de choque terrestre se superponen a otras similares correspondientes a la onda de choque interplanetaria, mucho mayor (*arriba*). Las ondas microscópicas de plasma (*abajo*), junto con ondas magnéticas de Alfvén y partículas aceleradas, llegaron al *ISEE-3* varias horas antes que la onda de choque interplanetaria.





6. LAS ONDAS DE CHOQUE COMETARIAS se producen cuando las moléculas neutras y los átomos del núcleo de un cometa se escapan hacia el viento solar antes de que los ionice la radiación ultravioleta. La incorporación de iones pesados del cometa en el viento solar decelera la marcha de éste (en virtud de la conservación de la cantidad de movimiento) y desencadena, así, una onda de choque. Los iones pesados originan ondas de Alfvén extremadamente intensas; por ello, las ondas cometarias son más espesas y más turbulentas y producen mayor aceleración de las partículas que las ondas de choque promovidas alrededor de los planetas (*izquierda*). La onda de choque supera incluso la cola cometaria visible (*derecha*).

radores, de TRW, aportaban la primera prueba de que el espesor del arco de choque terrestre variaba con la dirección del campo magnético del viento solar. Por cambiar este campo continuamente de dirección, las regiones donde el arco de choque es localmente casi perpendicular y aquellas donde es casi paralelo se mueven sin cesar, aun cuando el propio arco de choque permanezca sensiblemente estacionario. Donde el arco es casi perpendicular, también es delgado; donde casi paralelo, grueso a su vez.

A principios del decenio de 1970, los vehículos espaciales comenzaron a detectar pequeñas corrientes de partículas de alta energía, ondas acústicas iónicas y ondas de Alfvén en puntos muy alejados, corriente arriba, de donde se suponía que estaba el arco de choque de la Tierra. El programa ISEE, incoado en 1977, estableció que toda esa actividad corriente arriba formaba parte del extenso arco de choque cuasiparalelo. El arco es tan grueso que deja chico a nuestro planeta, por cuya razón los satélites en órbita terrestre no pueden medir realmente su tamaño.

Sí está al alcance sondeador de las naves espaciales otra clase, mayor, de ondas de choque. Las fulguraciones de la corona solar desencadenan ocasionalmente gigantescas ondas de choque que se propagan a través del medio interplanetario hasta los confines del sistema solar. Los instrumentos a bordo pueden observar esas ondas, a su paso. Uno de nosotros (Kennel), con otros participantes del proyecto ISEE, halló que la región de turbulencia de Alfvén y acústica iónica, corriente arriba de ondas de choque interplanetarias cuasiparalelas, podía abarcar más de un millón de kilómetros de espesor.

Las ondas de Alfvén desempeñan un papel prominente en los arcos de choque que se forman delante de los cometas, cuando éstos atraviesan el viento solar en el sistema solar interno. Los núcleos cometarios son, en su pequeñez, incapaces de causar perturbaciones físicas detectables en el flujo del viento solar (el diámetro del núcleo del cometa Halley, por ejemplo, mide sólo unos 15 kilómetros) y poseen campos magnéticos despreciables. Por eso mismo, los cometas no pueden generar ondas de choque a la manera de los planetas. Pero se ha descubierto que, cuando los cometas se aproximan al Sol, crean intensos arcos de choque sin colisiones.

La luz solar evapora los átomos y moléculas de la superficie del núcleo cometario. La mayor parte del gas liberado, ionizado por la luz ultravioleta solar, forma una nube de plasma similar a la ionosfera terrestre. El viento solar nunca atraviesa la ionosfera cometaria, ni ésta crea la onda de choque. Los agentes principales en la producción de las ondas de choque cometarias son los pocos átomos y moléculas neutros que consiguen escapar de esa ionosfera. Atomos y moléculas que acabarán también finalmente ionizados, aunque a distancia mucho mayor del cometa, donde han penetrado en el viento solar.

Las partículas recién ionizadas responden a los campos eléctricos y magnéticos del viento solar uniéndose a la corriente. Así aumenta la densidad másica del viento solar, y, de acuerdo con la ley de conservación de la cantidad de movimiento, disminuye la velocidad del viento. Si consideramos que los iones cometarios son mucho más pesados que los protones del viento solar, entenderemos por qué basta cierto número de tales iones para decelerar apreciablemente el viento solar.

Hace más de 20 años, Ludwig Biermann, del Instituto Max Planck de Astrofísica en Munich, sugirió que la deceleración del viento solar debería producir una onda de choque similar a un arco planetario. Durante su encuentro en 1986 con Halley, la nave *Vega-1* oyó la cacofonía de la onda de plasma que indicaba la existencia de una onda de choque a un millón aproximado de kilómetros del núcleo, la distancia predicha por la teoría de Biermann.

Las naves espaciales *Vega*, soviética, *Suisei*, japonesa, y *Giotto*, europea, hallaron los dos tipos de ondas de choque en el cometa Halley: cuasiperpendiculares y cuasiparalelas. Las segundas se parecían a las de los planetas. Los iones pesados, corriente arriba de las ondas de choque cometarias cuasi-perpendiculares, generan, sin embargo, una intensa turbulencia debida a ondas de Alfvén, lo que no ocurre alrededor de los planetas.

Las ondas de choque que desarrollan ondas de Alfvén pueden también acelerar un pequeño grupo de partículas confiriéndoles altas energías. Los "choques" de partículas con ondas de Alfvén recuperan, para el fren-

te de onda de choque, las partículas que escapaban. Cada vez que lo cruzan, las partículas aumentan su energía. Este mecanismo de aceleración se basa en el que propuso Enrico Fermi en 1954. En 1986, uno de nosotros (Kennel) y sus colaboradores del ISEE comprobaron que cierta hipótesis de Fermi sobre la aceleración, desarrollada para las ondas de choque astrofísicas por Martin A. Lee, de la Universidad de New Hampshire, superaba con éxito la prueba de la observación. Ahora bien, el proceso de Fermi se desenvuelve con tal lentitud, que los protones acelerados por ondas de choque interplanetarias y cuasiparalelas sólo alcanzan energías del orden de cientos de miles de electronvolts el tiempo de un día, que es lo que tarda la onda de choque en propagarse desde el Sol hasta la Tierra. En comparación, los rayos cósmicos —partículas subatómicas de alta energía y núcleos atómicos de las profundidades del espacio— tienen energías de hasta 100 billones de electronvolts.

La explosión de estrellas —supernovas— crea ondas de choque muy intensas que se propagan en el plasma interestelar a decenas de miles de kilómetros por segundo. No podemos situar una nave espacial delante de una onda de choque de supernova, ni, en consecuencia, afirmar con seguridad si ésta genera ondas de Alfvén y acelera los iones interestelares. Pero sí podemos aplicar a las ondas de choque de supernova la teoría de aceleración de partículas que se está ensayando para las ondas de choque del sistema solar.

Las ondas de choque de supernova duran aproximadamente un millón de años antes de extinguirse; ello significa que las partículas cuentan con tiempo para alcanzar energías altísimas por medio del mecanismo de Fermi. Trabajando cada uno por su lado, Germogen F. Krymskii, del Instituto de Investigación en Física Espacial y Aeronomía de Yakutsk, URSS, Roger D. Blandford, del Instituto de Tecnología de California, y Ian W. Axford, del Instituto Max Planck de Aeronomía de Katlenburg-Lindau, con sus respectivos colaboradores, mostraron en 1977 que la distribución de energía de las partículas aceleradas por ondas de choque sin colisiones era virtualmente idéntica a la de los rayos cósmicos.

Durante largo tiempo, el origen de los rayos cósmicos ha constituido un misterio. Para muchos astrofísicos, se crean cuando las ondas de choque de las supernovas aceleran las partículas, aunque seguimos sin saber de qué modo éstas alcanzan las más altas energías observadas.

Las ondas de choque sin colisiones existen incluso, muy probablemente, alrededor de remotas galaxias. Los procesos dinámicos que se desarrollan en el centro de algunas galaxias activas (que alojan quizás un agujero negro de enorme masa) crean chorros supersónicos de cientos de miles de años-luz de longitud. Cuando los chorros interaccionen con el plasma que rodea la galaxia se producirán, cabe presumir, ondas de choque. Las radioemisiones de los chorros hablan de unos electrones acelerados hasta energías altísimas. Albert A. Galeev, director del Instituto Soviético de Investigación Espacial, sugiere que una teoría que él y sus colegas formularon para explicar la aceleración, por ondas híbridas bajas, de los iones del arco de choque terrestre podría aclarar también cómo se aceleran los electrones en los chorros galácticos.

La investigación contemporánea sobre las ondas de choque sin choques abarca fenómenos que varían inmensamente en tamaño y origen. Los conceptos que nosotros y otros ideamos, hace veinte años, han resultado constituir una base razonable para comprender las ondas de choque sin colisiones. Los vehículos espaciales han hallado ejemplos de la mayoría de las clases de ondas de choque predichas por la teoría. Todavía están por llegar medidas refinadas y cálculos numéricos que simulen minuciosamente la ingente variedad de ondas de choque hallada en la naturaleza. En buena parte de los casos, los mecanismos aquí descritos, de relativa sencillez, aparecen entremezclados de maneras fascinantes. Además, se trata de una teoría que ha permitido a los físicos especular con cierta confianza sobre los procesos subyacentes bajo algunos de los más grandiosos y violentos fenómenos del universo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

UPSTREAM WAVES AND PARTICLES. *Journal of Geophysical Research*, vol. 86, n.º A6, págs. 4319-4529; 1 de junio de 1981.

HANDBOOK OF PLASMA PHYSICS. Dirigido por M. N. Rosenbluth y R. Z. Sagdeev. North-Holland Publishing Company, 1983.

COLLISIONLESS SHOCKS IN THE HELIOSPHERE: REVIEWS OF CURRENT RESEARCH. Dirigido por Bruce T. Tsurutani y Robert G. Stone. American Geophysical Union, 1985.

NONLINEAR PHYSICS: FROM THE PENDULUM TO TURBULENCE AND CHAOS. R. Z. Sagdeev, D. A. Usikov y G. M. Zaslavsky. Traducido del ruso por Igor R. Sagdeev. Harwood Academic Publishers, 1988.

Virus de la hepatitis B

Extraordinario microorganismo que, además de producir enfermedades hepáticas, origina una forma común de cáncer. Se confía en las nuevas vacunas, creadas mediante ingeniería genética, para su erradicación

Pierre Tiollais y Marie-Annick Buendia

La hepatitis B es en sí misma un problema sanitario grave y muy extendido. Pero encierra una amenaza peor. El virus que la produce es el carcinógeno humano más importante, después del tabaco. Cientos de millones de personas, la mayoría habitantes de regiones con escasos recursos asistenciales, están crónicamente infectados con el virus y tienen una probabilidad muy elevada de contraer cáncer de hígado. Muchos de esos portadores crónicos aparentan estar sanos, pero pueden transmitir el virus de la hepatitis B a otras personas con quienes se hallen en estrecho contacto, iniciándose así otro ciclo de la enfermedad.

Para nuestra fortuna, las posibilidades de cortar ese ciclo han aumentado notablemente durante los últimos diez años. Las técnicas del ADN recombinante, o ingeniería genética, han permitido sacar a la luz muchos secretos del virus de la hepatitis B (VHB). Conocemos ya su forma peculiar de vida y estamos cada vez más cerca de saber el porqué de su potencial oncogénico. Más. Las vacunas producidas por ingeniería genética pueden evitar su propagación.

El primer paso en la identificación del virus de la hepatitis B data de 1963, cuando Baruch S. Blumberg, entonces en el Instituto para la Investigación del Cáncer, de Filadelfia, estudiaba ciertas proteínas del suero sanguíneo. En una muestra de un paciente hemofílico, detectó anticuerpos que reaccionaban contra un antígeno presente en la sangre de un aborigen australiano infectado con hepatitis. En 1968, Blumberg lo identificó como el antígeno de superficie del VHB (AgsHB).

En la década siguiente, la falta de un sistema de cultivo celular que permitiese la propagación del VHB dificultó el progreso de las investigaciones. Hasta que, en 1978, nuestro laboratorio, junto con otros, abordó el problema con las técnicas del ADN recombinante. Hoy día, el trabajo sobre el VHB se ha convertido en la aplicación más afortunada de dicha tecnología a la virología médica.

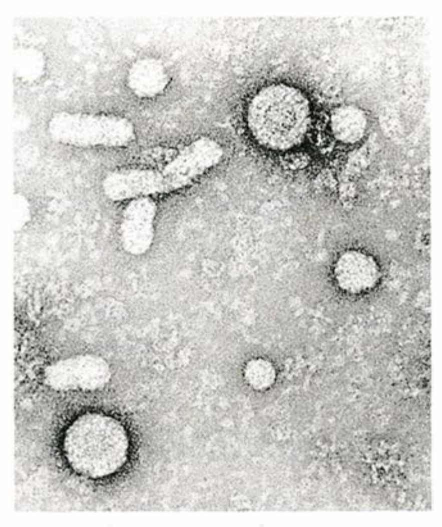
PIERRE TIOLLAIS y MARIE-ANNICK BUENDIA iniciaron la aplicación de las técnicas del ADN recombinante al estudio del virus de la hepatitis B. Tiollais es director de una unidad de investigación INSERM del Instituto Pasteur, amén de profesor de bioquímica en la Universidad de París 7. A él se debe la primera clonación de dicho microorganismo. Buendía, directora de investigación del CNRS en el Instituto Pasteur, obtuvo su doctorado en bioquímica por la Universidad de París en 1977. Ha desempeñado un papel destacado en el esclarecimiento de los mecanismos por los cuales el virus de la hepatitis de marmotas induce cáncer hepático.

Las personas infectadas con el VHB suelen desconocer tal circunstancia. Tras un período de incubación de dos a seis meses, la infección puede conducir a una hepatitis aguda, con daños hepáticos, dolores abdominales, ictericia, niveles elevados de ciertas enzimas en sangre y otros síntomas. Llegado este punto, la infección del VHB puede diagnosticarse por la presencia de los AgsHB en el suero sanguíneo del paciente. Lo más frecuente, sin embargo, es que no se manifiesten los síntomas de la enfermedad.

En casos muy contados, la infección del VHB produce una hepatitis fulminante, forma de la enfermedad de progresión celerísima y a menudo fatal, que destruye una parte considerable del hígado. La lesión hepática no es indicativo de una forma especialmente virulenta del virus; es la consecuencia de una fuerte respuesta inmunológica por parte del paciente. Los linfocitos *T* "asesinos" atacan a las células infectadas, que portan los antígenos víricos en su superficie.

El enfermo con hepatitis aguda suele recuperarse del todo. Los síntomas clínicos y biológicos de la infección desaparecen gradualmente, a medida que se sintetizan más anticuerpos contra el virus. Una vez recuperado, el paciente sigue produciendo bajos niveles de esos anticuerpos, que se encargan de mantener la inmunidad contra el VHB durante varios años. En el caso de un nuevo ataque por el mismo virus, los niveles de anticuerpos suben rápidamente y lo neutralizan.

En algunos pacientes, sin embargo, persisten en la sangre elevados niveles de antígenos víricos durante varios años, o incluso durante toda la vida, sin que aparezcan anticuerpos contra los AgsHB. El virus se agazapa en el hígado y el paciente se convierte en portador crónico. Se desconoce el



1. VIRUS DE LA HEPATITIS B y su doble pared envolvente, formada por una cubierta exterior y otra interna o cápside, que contiene el ADN vírico. En la sangre de las personas infectadas aparecen también muchas partículas víricas incompletas, como se observa en la micrografía (*arriba*). Esas partículas son microsferas o largos filamentos, sin estructura interna. En su superficie aparecen sólo dos de las tres proteínas características de la envoltura vírica.

mecanismo en virtud del cual se asienta ese estado crónico, si bien parece guardar relación con cierta debilidad en la respuesta inmune. (En el 80 por ciento de los niños, con un sistema inmune inmaduro, la infección se convierte en crónica, circunstancia que sólo se produce en el 5-10 por ciento de los adultos.)

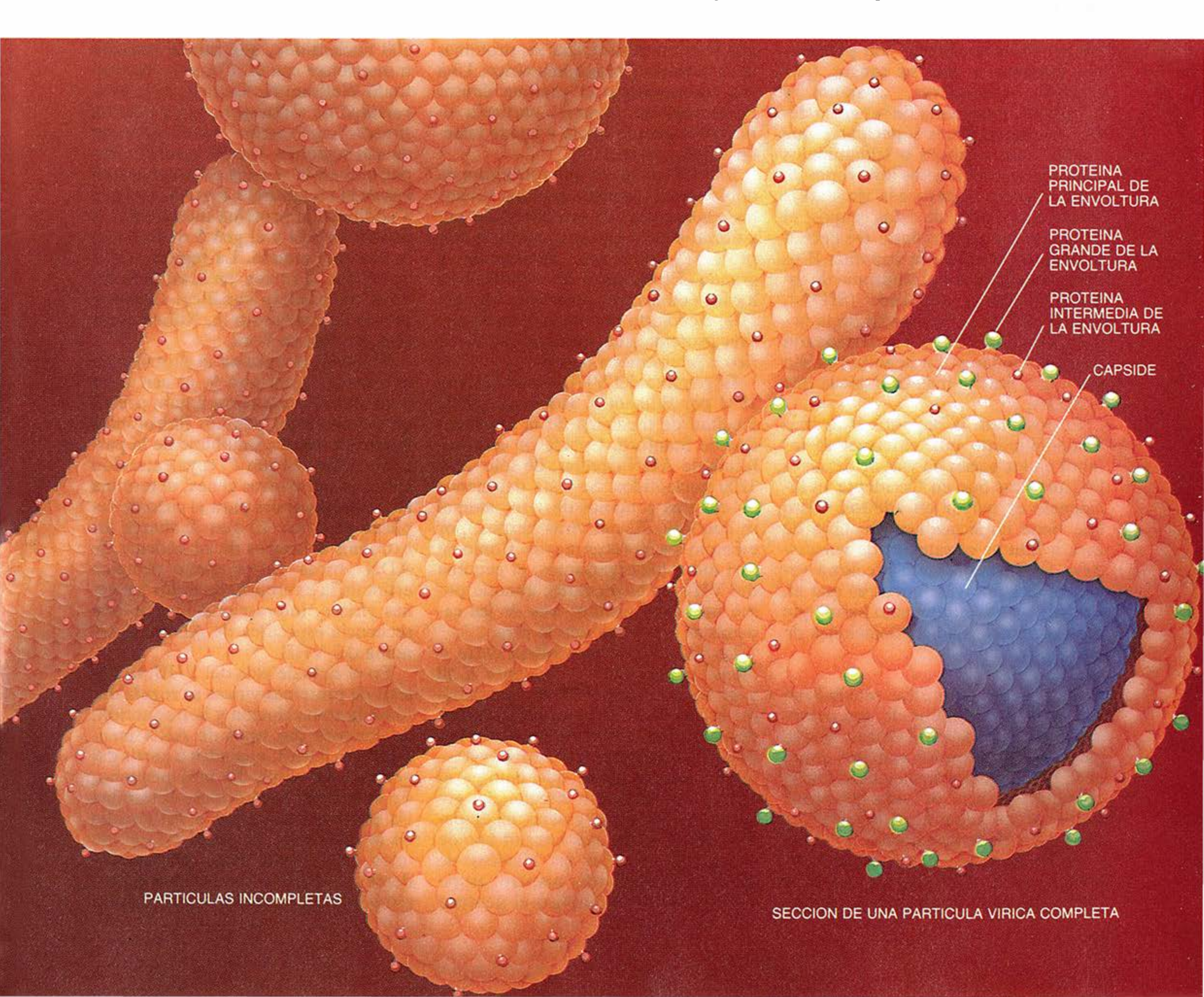
Las infecciones crónicas muestran una morfología variopinta. Hay portadores que están sanos, con daños hepáticos limitados y sin carencias funcionales. Otros adquieren una forma crónica persistente, generalmente asintomática, que a veces provoca cierta fatiga. En el peor de los casos, la hepatitis crónica progresa y puede conducir a una cirrosis hepática y a un carcinoma hepatocelular (CHC), un cáncer hepático primario. Normalmente, el cáncer se desarrolla después de un período de latencia de 30-50 años, aunque en algunos casos se hayan observado CHC en niños.

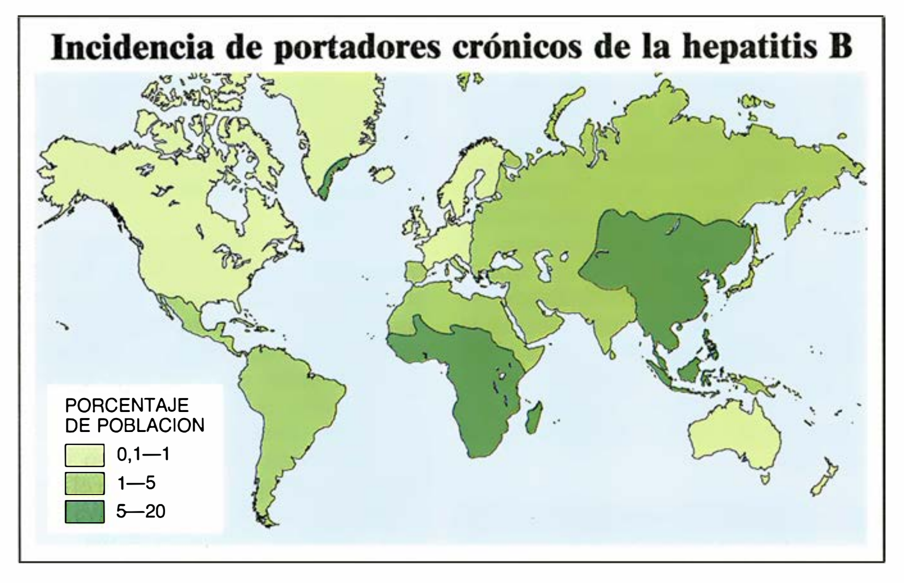
La vinculación de la infección crónica con el desarrollo de CHC no admite dudas. El porcentaje de portadores crónicos entre pacientes con CHC supera el que se da entre el resto de la población. En un estudio epidemiológico realizado en Taiwan, R. Palmer Beasley, de la Universidad de Texas en Houston, ha demostrado que, en los portadores crónicos, el riesgo de contraer CHC centuplica el peligro normal. Otros trabajos han encontrado también una asociación causal, sólida y específica, entre VHB y CHC. El VHB constituye, pues, uno de los pocos virus conocidos que producen un cáncer específico en el hombre.

La gravedad de esa vinculación del VHB con el cáncer se percibe sin más que fijarse en el número altísimo de individuos infectados. En todo el mundo habrá poco menos de 300 millones de personas con infección crónica de VHB, tres cuartas partes de las cuales viven en Asia. El grado de incidencia varía bastante de una región a otra. En el sureste asiático y Africa tropical, los portadores crónicos representan el 10 % o más de la población, mientras que en América del norte y la mayor parte de Europa occidental, ese porcentaje no llega al 1 por ciento.

En el Tercer Mundo, el virus suele transmitirse de madre a hijo, durante el primer mes de vida de éste, y principalmente en el nacimiento. Si el pequeño infectado es niña, se convertirá probablemente en portadora crónica y transmitirá el VHB a su descendencia cuando alcance la edad fértil. Pero la transmisión madre-hijo no es el único mecanismo. Puesto que el virus puede estar en la sangre, saliva y semen, cualquier contacto íntimo o sexual puede contagiar la enfermedad. Esta circunstancia explica la facilidad con que se propaga la hepatitis B dentro de una familia o en una comunidad pequeña.

En los países industrializados de





2. PORTADORES CRONICOS del VHB, más frecuentes en los países en vías de desarrollo, donde tales infecciones son endémicas. Sólo en Asia hay unos 225 millones de afectados.

Occidente importan más otros mecanismos de propagación del VHB. Las poblaciones de alto riesgo son personas en contacto directo con portadores crónicos o con su sangre (por ejemplo, enfermeras, cirujanos y dentistas), receptores de sangre o derivados (hemofílicos y pacientes que reciben transfusiones o tratamientos de diálisis), drogadictos intravenosos, homosexuales y personas sin pareja sexual fija. Fuera de estos grupos, el riesgo de contagio es bajo. De hecho, la epidemiología de la hepatitis B es muy parecida a la del síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SIDA), lo que explica la frecuencia de la hepatitis B entre sidosos y enfermos con cuadros similares. La hepatitis es, sin embargo, mucho más contagiosa que el SIDA.

En resumen, la hepatitis B es fundamentalmente una enfermedad infantil en los países en vías de desarrollo, mientras que en Occidente su incidencia es mayor en adultos. Dato que tiene implicaciones prácticas de cara a futuras estrategias de vacunación. El Tercer Mundo precisará vacunaciones masivas, mientras que en los países occidentales sólo habrá que prestar atención a las poblaciones de alto riesgo.

Las vacunas antivíricas sensibilizan el sistema inmune de una persona contra las moléculas víricas. Buena parte de los primeros trabajos sobre el VHB se encaminaron a descifrar la estructura y ciclo de vida del virus; tratábase de identificar los blancos adecuados de la vacunación.

Todos los virus y parásitos celulares portan un cromosoma de ADN o ARN (genoma) empaquetado dentro de una cápside proteica. Para proliferar, el virus debe penetrar en la célula y utilizar la maquinaria de ésta que le permita sintetizar las proteínas de la cubierta y el genoma vírico. Una vez empaquetado el genoma dentro de su cubierta, la nueva partícula vírica abandona la célula y puede infectar células vecinas.

El VHB presenta una estructura de doble pared, formada por dos cubiertas concéntricas de proteínas. La envoltura, o capa externa, contiene tres proteínas: principal, intermedia y grande. El antígeno de superficie se localiza en las tres proteínas. La cápside, o cubierta interna, consta de una sola proteína que rodea al ADN vírico e interacciona con él.

El genoma del VHB fue aislado en 1974 por William S. Robinson, de la facultad de medicina de la Universidad de Stanford. Consta de una molécula de ADN circular, de sólo unos 3200 nucleótidos. Se trata del menor de cuantos genomas de virus animal se conocen. El del virus herpes, por ejemplo, es 50 veces mayor. Como en casi todos los organismos, el genoma del VHB es bicatenario, aunque posee un rasgo insólito: una de las cadenas es más larga que la otra.

La longitud de la cadena corta o "más" es variable y oscila entre el 50 y el 80 por ciento de su compañera, la "menos". (Como explicaremos después, esta estructura peculiar obedece al mecanismo replicativo, característicamente suyo, que emplea el virus.) La estructura circular del genoma se mantiene gracias al emparejamiento de las cadenas por uno de sus extremos. Con las técnicas de ADN recombinante, nuestro grupo clonó, esto es, multiplicó el genoma del VHB en la bacteria *Escherichia coli*; era a finales de los años setenta. Tal acontecimiento permitió la producción de grandes cantidades del virus y sus componentes, de obvio interés para posteriores estudios.

Patrick Charnay, de nuestro laboratorio, y Francis Galibert, del Hospital San Luis, también de París, determinaron seguidamente la secuencia completa de nucleótidos del genoma del VHB; fue la primera información que se tuvo sobre la organización genética del virus.

El genoma del VHB es un prodigio de economía de espacio. Consta de sólo cuatro genes potenciales: *S*, *C*, *P* y *X*, que además se solapan bastante. Las secuencias reguladoras que controlan la producción de las proteínas víricas y el ciclo de replicación se hallan también incluidas en dichas secuencias codificadoras.

El gen *S*, que determina la proteína principal de la envoltura, incluye toda la información para el AgsHB. Precede al gen *S* la secuencia de unos 500 nucleótidos, que puede también transcribirse con él. Como ha demostrado Wolfram H. Gerlich, de la Universidad de Göttingen, esa secuencia situada "curso arriba" puede dividirse en dos regiones, pre-*S1* y pre-*S2*, implicadas en la síntesis de otras proteínas de la envoltura. La pre-*S2* y el gen *S* codifican la proteína intermedia; la pre-*S1*, pre-*S2* y el gen *S* determinan la proteína grande. La región pre-*S1* interviene, a su vez, en la entrada del virus en la célula hepática, según ha puesto de manifiesto A. Robert Neurath, de Nueva York.

El gen *C* determina la proteína de la cápside. Igual que *S*, el gen *C* va precedido de una corta región pre-*C*, que codifica un péptido hidrofóbico implicado en el ensamblaje de la partícula vírica. El gen *P*, cuya extensión cubre en parte otros genes, determina enzimas esenciales para el ciclo de replicación vírica. El gen *X* abarca los extremos cohesivos de las cadenas de ADN víricas. Su producto proteico estimula la expresión de todos los genes víricos, interaccionando con una secuencia específica de ADN del genoma del VHB.

En el ciclo de vida del VHB, la síntesis de proteínas víricas se regula durante la transcripción y la traducción. Se conocen dos tipos de ARN mensajero (ARNm), copiados a partir del genoma del virus. El más pequeño, de unos 2100 nucleótidos, determina las proteínas principal e intermedia de la envoltura. El ARN mayor, de unos 3500 nucleótidos, es sorprendente. De longitud mayor que el propio genoma, contiene una repetición

terminal de unos 100 nucleótidos. El ARNm grande determina la proteína de la cápside y los productos del gen *P*, según han demostrado Harold E. Varmus, de la Universidad de California en San Francisco, y Heinz Schaler, de la Universidad de Heidelberg. Actúa también de intermediario en la replicación del ADN vírico; lo veremos enseguida.

Elementos "intensificadores" de la transcripción, presentes en el genoma del VHB, activan la expresión de todos los genes víricos y operan, de manera preferente, en las células hepáticas. Otros elementos reguladores modulan los niveles de ciertas proteínas, una a una. Buen ejemplo de la complejidad de este mecanismo lo tenemos en la variación que se observa en la concentración de proteínas grande, intermedia y principal de la envoltura que se sintetizan en células hepáticas infectadas. Las proteínas grandes se producen en pequeñas cantidades; aparecen sólo en la superficie de la partícula vírica completa e infecciosa. Por su parte, las proteínas principales (y en menor grado las intermedias) se sintetizan en demasía y son secretadas en subpartículas menores (22 nanómetros), más abundantes en el suero que las partículas completas.

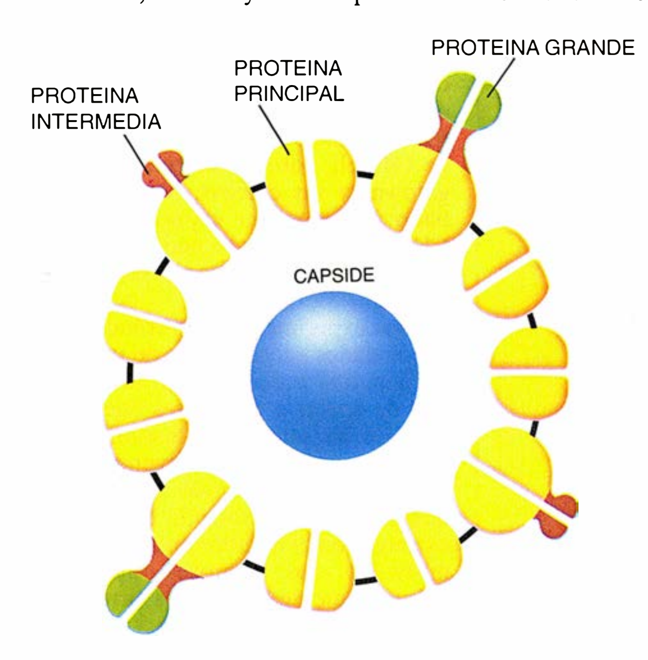
Nos preocupaba la resolución de una cuestión importante: ¿cómo se regulaba la expresión de los diferentes genes del VHB? Hemos descubierto que los ratones transgénicos, animales que portan en su propio ADN parte del genoma del VHB, si no entero, constituyen unas poderosas herramientas para estudiar la expresión de los genes víricos en tejidos hospedadores normales.

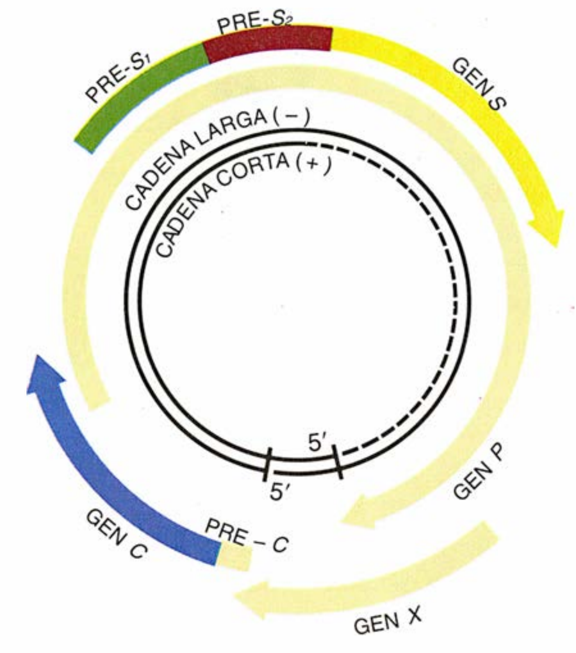
Trabajando con ratones transgénicos, Christine Pourcel, de nuestro laboratorio, estudió la tendencia preferente del VHB a infectar determinados hospedadores y ciertos tejidos dentro de éstos. Y llegó a la demostración de que el gen *S* se expresaba abundantemente sólo en tejidos hepáticos y bajo el control de hormonas esteroides. Estos descubrimientos arrojaban luz sobre los estudios realizados con portadores de VHB humanos, que habían demostrado que los hombres (cuyos niveles naturales de hormonas esteroides son mayores que los de las mujeres) presentaban mayor riesgo de infección crónica, daños hepáticos y CHC.

En otras estirpes de ratones transgénicos, Pourcel observó formas víricas replicantes en células de riñón y corazón; no sólo en el hígado. Estos resultados reflejaban, a su vez, la afinidad del VHB por diferentes tejidos en humanos. Aunque el virus suele abundar en el hígado, nos encontramos con ADN y proteínas en riñones, bazo, páncreas, piel, médula ósea y células sanguíneas circulantes. Las células sanguíneas podrían constituir los primeros blancos de la infección del VHB; virus allí agazapados podrían reaparecer y atacar a los nuevos hígados en pacientes con hepatitis receptores de trasplantes. La infección de ciertos leucocitos podría guardar relación directa con otras enfermedades (por ejemplo, la anemia aplásica y la poliartritis nodosa) y con el desarrollo del SIDA y afines.

Parte de nuestro conocimiento sobre el VHB procede del estudio de ciertos virus similares: los hepadnavirus. Provocan éstos unos cuadros similares al que presenta la hepatitis en animales. En los últimos años se han descubierto hepadnavirus que infectan a marmotas, ardillas terrestres, pato pequinés, ardillas trepadoras y garzas. Las partículas víricas de esos virus animales se parecen mucho a la de VHB. Igual que el VHB, sus genomas son moléculas de ADN parcialmente unicatenarias y circulares; casi todos poseen organizaciones genéticas idénticas.

Los hepadnavirus se reproducen a través de un mecanismo extraordinario. La mayoría de los virus de ADN copian directamente sus genomas con el concurso de polimerasas. Estas enzimas utilizan las cadenas originales de ADN de molde donde ensamblar las nuevas cadenas complementarias. Los hepadnavirus siguen, por contra, un método indirecto, en el que una cadena de ARN actúa de intermediario. Esa vía fue identificada en 1982 por Jesse W. Summers y Williams S. Mason, del Centro Fox Chase del Cáncer, en Filadelfia, quienes trabajaban con el virus que infecta al pato pequinés. Se trata del mecanismo siguiente: una vez que el genoma del hepadnavirus penetra en una célula, continúa hacia el núcleo; aquí, las polimerasas celulares lo transcriben en una larga molécula de ARN. El progenoma, nombre que recibe esa molécula, consta de 3500 nucleótidos; progenoma y una ADN-polimerasa vírica quedan empaquetados en una cápside recién formada, pasando al





3. PROTEINAS VIRICAS presentes en la partícula infecciosa de la hepatitis B (*izquierda*). Están determinadas por genes que solapan sus secuencias de ADN (*derecha*). Los colores relacionan a las proteínas con sus genes. Otros genes fabrican productos esenciales para el ciclo del virus.

citoplasma de la célula. Allí, la polimerasa empieza a trabajar, retrotranscribiendo el pregenoma en una nueva cadena de ADN de tipo menos. Constituida la cadena menos, las enzimas destruyen el pregenoma. A continuación, las ADN-polimerasas (o polimerasas de ADN) reconstruyen la cadena más, proceso en que la menos cumple la función de molde. Conforme va saliendo de la célula hepática, el virus recibe una segunda envoltura externa. En ese momento, se detiene inmediatamente la elongación de la cadena más. Por eso varía la longitud de dicha cadena.

En líneas generales, el peculiar mecanismo de replicación que distingue a los hepadnavirus representa la imagen especular del utilizado por los retrovirus, como el virus del SIDA, que poseen genoma de ARN y emplean, de intermediario, una molécula de ADN. Hepadnavirus y retrovirus comparten otros rasgos. Ambos están capacitados para infectar crónicamente las células sin tener que destruirlas. El orden y función de los genes retrovíricos *gag*, *pol* y *env* admiten una comparación directa con los genes *C*, *P* y *S* de los hepadnavirus. (*Gag* determina la proteína de la cápside retrovírica, *pol* una transcriptasa y *env* la proteína de la envoltura.) Las dos familias víricas desencadenan también ciertos tumores malignos.

Los estudios epidemiológicos indican sin ambages la capacidad de la infección crónica con VHB o hepadnavirus para inducir enfermedades hepáticas. Los mamíferos crónicamente infectados con hepadnavirus, por ejemplo, muestran una elevada incidencia de tumores hepáticos. Más del 80 % de las marmotas infectadas desarrollan cánceres hepáticos primarios a los dos años. Hans Popper, de Cornell, John L. Gerin, de Georgetown, y sus colegas, han comprobado la inducción experimental de CHC en marmotas, inoculándoles virus de la hepatitis propio de esa especie.

Esos experimentos confirmaban las propiedades cancerígenas de un virus de hepatitis y descartaban la necesidad de apelar a cofactores oncogénicos. En las patologías humanas, sin embargo, podrían intervenir otras condiciones: el período de latencia que precede al desarrollo de la CHC es mayor en el hombre que en la marmota, y los tumores aparecen frecuentemente en hígados cirróticos. Carcinógenos ambientales y un consumo excesivo de alcohol pueden tener que ver también con el origen del CHC humano.

Replicación del virus de la hepatitis B

1 El virus de la hepatitis B infecta las células hepáticas.

2 Las enzimas se encargan de alargar la cadena corta de ADN del genoma vírico.

3 El ADN vírico avanza hacia el núcleo celular; una vez allí, se copia en ARN. La cadena de ARN, de 3,5 kilobases, recibe el nombre de pregenoma; sirve de intermediario en una replicación posterior.

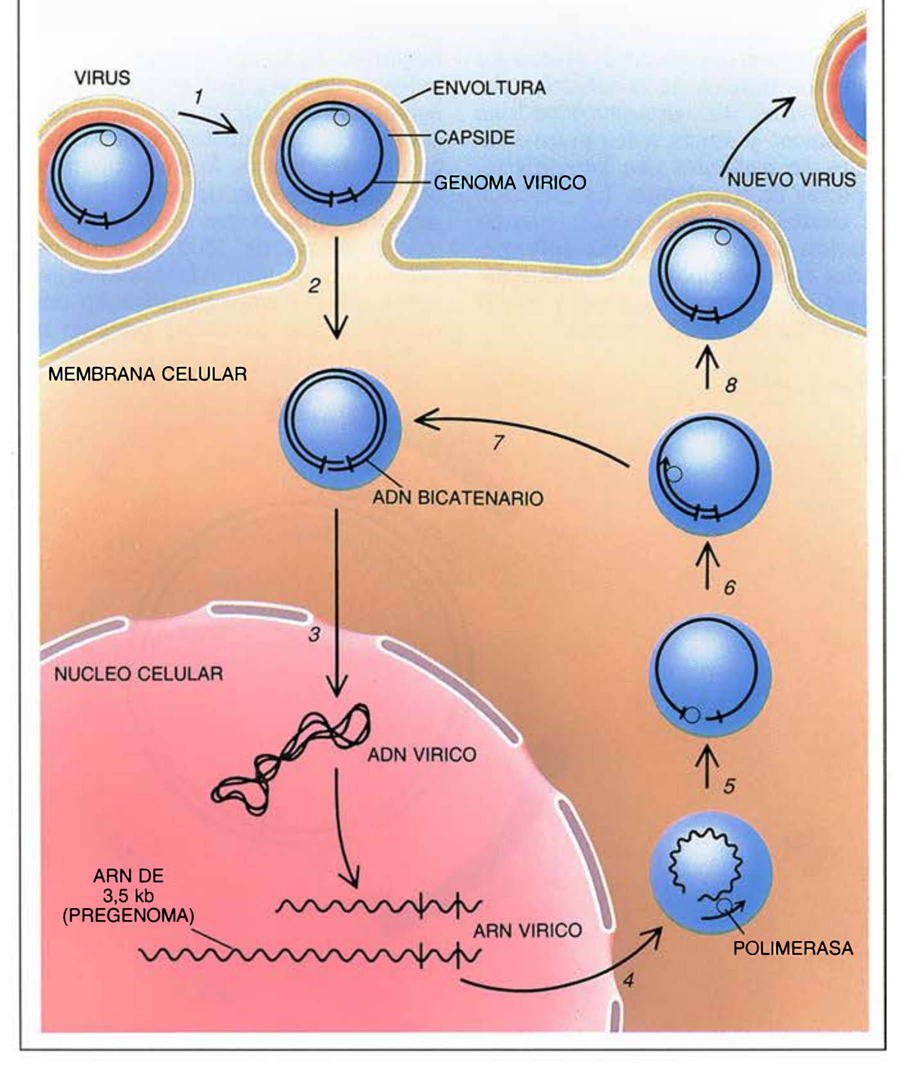
4 Empaquetamiento del pregenoma en una cápside recién sintetizada. La enzima polimerasa comienza a sintetizar una copia en ADN del pregenoma.

5 La nueva cadena de ADN es un duplicado de la cadena larga original del genoma vírico. El pregenoma se desintegra a medida que se va fabricando el nuevo ADN.

6 Las polimerasas reconstruyen una cadena de ADN complementaria, a partir de la cadena larga, que actúa de molde.

7 Si el ADN vírico permanece en la célula el tiempo suficiente, se convierte en bicatenario. En este caso, vuelve al núcleo para otra ronda replicativa.

8 Si, en vez de replicarse de nuevo, la partícula vírica sale de la célula, la cápside se rodeará de otra envoltura. Se suspende de inmediato el alargamiento de la cadena corta de ADN.



La forma en que el VHB induce cáncer sigue siendo objeto de debate. Pudiera ocurrir que el virus desencadenara directamente el desarrollo del tumor. Cabría también que el tumor hepático se produjera de forma indirecta, en virtud de los procesos de inflamación crónica, cirrosis y regeneración celular que tienen lugar en los tejidos enfermos.

Muchos virus tumorales portan oncogenes, esto es, genes capaces de transformar directamente células infectadas. (Oncogenes similares residen de forma natural en las células, donde parecen controlar el crecimiento y el desarrollo). Ahora bien, el genoma del VHB no parece contener ningún oncogén. Además, el largo período de latencia entre la infección por ese virus y la manifestación del tumor no se compagina con la idea de que el CHC se deba a un oncogén vírico. Es posible, no obstante, que el activador génico producido por el gen *X* del VHB esté implicado en fases precoces del proceso de formación del tumor.

El virus puede también transformar las células en que se hospeda a través de la inserción de su ADN en el cromosoma celular. La inserción de la secuencia vírica junto a un oncogén celular puede descontrolar su expresión y provocar un crecimiento desbocado. Estamos hablando de la estrategia típica de retrovirus que inducen leucemias y carcinomas en mamíferos y aves tras un período de latencia. Aunque el VHB no precisa normalmente integrar el material genético en el genoma de su hospedador para completar su ciclo vital, tales formas integradas pueden darse en alguna que otra ocasión.

Christian Brechot, en nuestro laboratorio, David A. Shafritz, de la Facultad de Medicina Albert Einstein, y William S. Rutter, de la Universidad de California en San Francisco, analizaron el ADN de CHC y descubrieron secuencias víricas integradas en los cromosomas de las células tumorales. Aunque esas secuencias se presentaban, de preferencia, en tumores de portadores crónicos de AgsHB, aparecieron también en tumores de pacientes que carecían de dichos antígenos AgsHB. En alguna ocasión se ha detectado ADN vírico integrado en el hígado de portadores crónicos del VHB, lo que sugiere que la integración del ADN pudiera ocurrir antes de la formación del tumor o en una etapa muy temprana.

Análisis de tumores y líneas celulares han demostrado que el VHB puede insertar su ADN en el cromosoma humano por muchos sitios distintos. Al hacerlo, suele provocar reorganizaciones genéticas importantes: como deleciones cromosómicas, translocaciones o multiplicaciones de secuencias (amplificaciones), desórdenes todos ellos comunes en los tumores humanos. Se ignora el alcance de las consecuencias que acarrean tales procesos.

En un CHC humano en fase precoz, Anne Dejean, de nuestro laboratorio, encontró cierta inserción de ADN de VHB en un miembro de una familia de genes encargada de fabricar receptores para hormonas tiroideas y esteroides. Aisló y caracterizó dicho gen; cuando identificó su producto génico, resultó ser un receptor para el ácido retinoico.

El ácido retinoico ejerce una poderosa influencia en la diferenciación y proliferación celular; se ha relacionado un exceso del mismo durante las primeras etapas del embarazo con determinadas patologías perinatales. Gracias al mismo, muchas células anormales cultivadas recuperan su forma normal, por cuya razón se emplea para el tratamiento de ciertas leucemias. Una mutación en el gen del receptor del ácido retinoico, causada por la inserción del ADN del VHB, podría desencadenar el CHC en humanos.

Brechot, contratado ahora por el Hospital Necker de París, observó también, en otro CHC humano, la integración de ADN del VHB en el gen de la ciclina A, proteína implicada en el crecimiento celular y cuya anómala expresión arruina el control normal de la proliferación celular. Necesitamos conocer mucho mejor la frecuencia de tales inserciones víricas en genomas celulares.

Las investigaciones realizadas sobre tumores de marmotas inducidos por virus de hepatitis han aportado nueva información del papel que la integración vírica desempeña en el CHC. En esos tumores, el ADN vírico se integra siempre; y en aproximadamente el 30 % de los casos hemos comprobado que dicha integración se produce en dos miembros de la familia de oncogenes celulares *myc*. Estos genes suelen intervenir en el control del crecimiento y diferenciación celular, aunque pueden también contribuir a la formación de tumores linfoides y varios tipos de carcinomas.

Una parte del genoma vírico, que porta el elemento intensificador, se inserta próxima al oncogén *myc*. No modifica su pauta de lectura o de codificación. La síntesis de proteínas Myc normales, ahora bajo el control de secuencias víricas, escapa al control celular pertinente. En consecuencia, la célula produce un derroche de proteínas Myc, que inducen un crecimiento celular desaforado. Se trata, a grandes rasgos, del mismo mecanismo que utilizan los retrovirus para desencadenar tumores linfoides en aves y roedores.

No hay datos que permitan aseverar la existencia de una vía parecida que conduzca al desarrollo de CHC en humanos. Pese a la investigación exhaustiva realizada, no se ha comprobado el desarrollo de mutaciones en los oncogenes *myc* provocadas por la inserción de ADN del VHB.

Ahora bien, esa inserción sí podría activar, directa o indirectamente, otros oncogenes humanos. Peter Hans Hofschneider, del Instituto Max Planck de Munich, ha demostrado que la integración de ADN del VHB produce proteínas modificadas que estimulan la expresión de genes víricos y celulares, incluidos potentes oncogenes. Francis V. Chisari, del Instituto de Investigación de la Clínica Scripps, habla de una vía más indirecta: en ratones transgénicos, la producción excesiva de macroproteínas del VHB acaba en lesiones crónicas de las células hepáticas e insta el desarrollo del CHC.

En experimentos de transferencia de ADN, Kenichi Matsubara, de la Universidad de Osaka, ha demostrado la activación de dos oncogenes celulares más: *lca* y *hst-1*; el *lca* interviene sólo en el CHC, mientras que el *hst-1* participaría también en la formación de cánceres de estómago. En tumores CHC humanos se han observado otras alteraciones genéticas que no han evidenciado una vinculación obvia con la infección por VHB. Habrá que seguir trabajando en el estudio del comportamiento molecular del virus en el proceso de carcinogénesis.

Los experimentos descritos hasta este momento ponen de manifiesto el protagonismo de la tecnología del ADN recombinante en el conocimiento de la biología básica del VHB. Importa repasar ahora sus aplicaciones prácticas en el desarrollo de nuevas técnicas de diagnóstico y vacunas.

El diagnóstico de la hepatitis B se perfeccionó con el uso de técnicas de hibridación molecular, que basan su eficacia en la alta afinidad de segmentos cortos de ADN clonado por su secuencia complementaria. El ADN vírico, clonado y marcado, sirve de sonda, muy fina, para detectar partículas víricas infecciosas en el suero sanguí-

neo. Se ha convertido en rutina de laboratorio la hibridación molecular con ADN del VHB para identificar infecciones de hepatitis B recientes. Como la identificación del ADN vírico permite también una estimación segura del número de replicaciones víricas que se producen, la hibridación molecular facilita el seguimiento del progreso de los tratamientos antivíricos.

La sensibilidad del método puede refinarse aún más con la técnica de la reacción en cadena de la polimerasa, un procedimiento enzimático sencillo, que permite duplicar incluso trazas de secuencias específicas de ADN, a un ritmo exponencial. Merced a esta técnica, las pruebas de diagnóstico basadas en la hibridación multiplican por mil su sensibilidad, al poder detectar hasta 100 partículas víricas por mililitro de suero, concentración considerada la mínima infecciosa.

Gracias a las técnicas del ADN recombinante, se desarrollan también nuevas vacunas. Estos progresos comenzaron en 1970, cuando Saul Krugman y sus colaboradores, de la Universidad de Nueva York, demostraron que el suero de un portador crónico, previamente inactivado por calor, protegía contra el VHB a personas sensibles. Más tarde, otros grupos demostrarían el efecto protector, en los chimpancés, de partículas víricas purificadas y portadoras de AgsHB.

En 1976, Philippe Maupas y sus colaboradores, de la Universidad de Tours, aportaron los primeros resultados de vacunaciones en humanos. Por vacuna emplearon partículas víricas defectivas, esencialmente envolturas con AgsHB vacías, purificadas de la sangre de portadores crónicos y tratadas para eliminar todas las posibles partículas infecciosas. Constituía la única vacuna antivírica desarrollada a partir de sangre de pacientes. Maupas y sus colegas demostrarían luego, con toda claridad, la seguridad y eficacia de las vacunas en un grupo muy extenso de pacientes: había entre ellos muchos niños de regiones donde el VHB es endémico y núcleos de alto riesgo donde no era endémico. (Menos eficaz resultaba la vacuna en pacientes sometidos a diálisis, por culpa quizá de la propia debilidad de su sistema inmune.)

Aunque la vacuna obtenida del suero es eficaz, su producción masiva plantea varios problemas. El suministro de suero humano procedente de portadores crónicos es limitado; el procedimiento de purificación, largo y costoso. Además, cada lote de vacuna, preparado a partir de un stock distinto de suero humano infectado, debe ensayarse primero, por motivos de seguridad, en chimpancés. De ahí que la idea de aplicar la ingeniería genética a la elaboración de una vacuna contra la hepatitis B se convirtiera en un reto atractivo.

Son varias las técnicas de ingeniería genética que se le ofrecen, en principio, a quien se propone sintetizar una vacuna. Pero la práctica se encarga de recortar su número: los AgsHB no son del todo inmunogénicos, a menos que mantengan su estructura natural completa. Las bacterias sometidas a manipulación genética pueden producir cantidades industriales de esos antígenos, pero el resultado no posee la estructura o forma química característica; sí lo consiguen, por contra, las levaduras y las células de mamíferos. Se expenden ya en el mercado farmacéutico vacunas contra el VHB sintetizadas por levaduras y células de mamífero. En efecto, debemos a Rutter la vacuna a partir de *Saccharomyces cerevisiae* (levadura de panadería). En 1984, Marie Louise Michel, de nuestro laboratorio, construyó genéticamente una línea de células ováricas de hámster chino que producía antígenos del VHB. El ADN recombinante del VHB que insertó contenía el gen *S* y la región pre-*S2*. Las partículas resultantes llevaban, por tanto, la proteína principal e intermedia de la envoltura, así como el AgsHB y los determinantes antigénicos pre-*S2*.

Este dato podría encerrar su interés. David R. Milich, de la Clínica Scripps, ha demostrado en ratones que los determinantes pre-*S2* provocan una respuesta inmune más fuerte que los antígenos de superficie del VHB. Además, en estirpes de ratones que no producen anticuerpos contra los AgsHB, la inmunización con las partículas recombinantes de Michel puede contrarrestar esa falta de respuesta. Esta propiedad sería importante para la vacuna de personas que no responden al antígeno en cuestión.

Otro enfoque a considerar en el empleo de técnicas del ADN recombinante sería la construcción de una vacuna viva, en la que sirvieran de vectores el virus de la vacuna de la viruela o el adenovirus. La ingeniería genética lograría que esos virus inocuos expresasen los antígenos del VHB. De momento no se ha recurrido a esa posibilidad para las vacunas

4. TRES PROPUESTAS para explicar la transformación, por causa de las infecciones de hepatitis B, de las células hepáticas en células tumorales. El ADN vírico puede activar genes celulares implicados en el crecimiento, insertándose junto a ellos (*ruta superior*), o en cualquier otra parte del genoma (*ruta central*). Otra posibilidad es que las células que se regeneran tras la infección activen erróneamente sus propios genes del crecimiento (*ruta inferior*).

aplicadas a humanos. Cabría también sintetizar químicamente secuencias de aminoácidos que dupliquen los determinantes antigénicos de los AgsHB, lo que constituiría una vacuna barata. Para nuestro infortunio, este enfoque tampoco es viable todavía porque la inmunogenicidad de esos péptidos artificiales, como los sintetizados por las bacterias, es extremadamente baja.

Además de prevenir la infección por el VHB mediante la elaboración de vacunas, las técnicas del ADN recombinante podrían tener al alcance de los dedos una terapia para los portadores crónicos. En agosto de 1990, Robert P. Perillo y sus colegas, de la Universidad de Washington, dieron a conocer que el tratamiento diario con interferón alfa, una proteína obtenida mediante ingeniería genética que dispara la respuesta inmune, eliminaba o inhibía la infección en más de una tercera parte de los 85 portadores crónicos del VHB estudiados. La investigación sobre el uso de interferón contra el VHB promete refinar y mejorar dichos tratamientos.

A lo largo de los últimos diez años, el progreso de la biología molecular del VHB ha encontrado aplicaciones médicas, entre ellas la prevención de las infecciones. Sólo comienzan a divisarse muchos de sus beneficios. En los países en vías de desarrollo, las vacunaciones generales con vacunas recombinantes, las primeras desarrolladas para humanos con técnicas de manipulación genética, ayudarán a controlar la hepatitis B. Esta campaña tendrá una doble consecuencia: además de prevenir las hepatitis agudas, las vacunaciones impedirán también el desarrollo del cáncer que aquéllas llevan asociado. Esperemos que ello sea el anuncio de una era de mejor calidad de vida, basada en una prudente aplicación de la ingeniería genética.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ADVANCES IN HEPATITIS RESEARCH. Dirigido por Francis V. Chisari. Masson Publishing USA, 1984.

HEPATITIS B. Dirigido por Robert J. Gerety. Academic Press, 1985.

THE HEPATITIS B VIRUS. Pierre Tiollais, Christine Pourcel y Anne Dejean en *Nature*, vol. 317, n.º 6037, págs. 489-495; 10 de octubre de 1985.

THE MOLECULAR BIOLOGY OF THE HEPATITIS B VIRUSES. Don Ganem y H. E. Varmus en *Annual Review of Biochemistry*, vol. 56, págs. 651-693; 1987.

VIRAL HEPATITIS AND LIVER DISEASE. Dirigido por Arie J. Zuckerman. Alan R. Liss, Inc., 1988.

Vidrios fotocrómicos y fotosensibles

Estos vidrios, a diferencia de los ordinarios, responden a la luz, lo que resulta en estructuras utilizables en electrónica, óptica y artes decorativas

Donald M. Trotter, Jr.

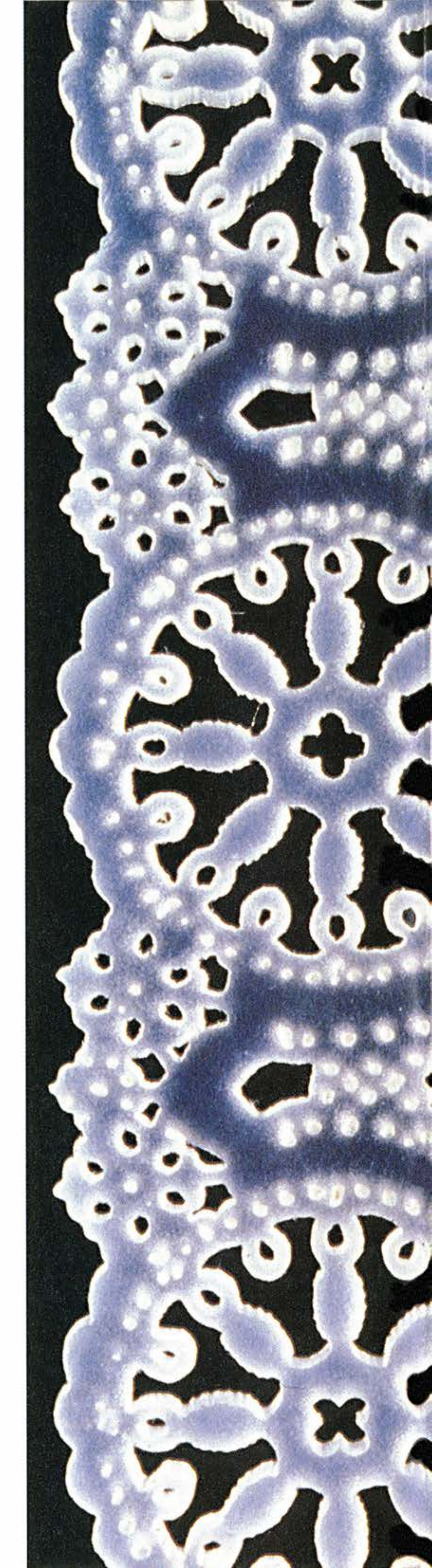
Desde unos 2000 años antes de Cristo, la inmensa mayoría de las civilizaciones que han ido descubriendo el arte de la fabricación de vidrio han sacado provecho de sus muchas cualidades para construir vasijas, ornamentos y esculturas. La característica distintiva que separa al vidrio de la loza es, claro está, su transparencia. La luz atraviesa el vidrio sin apenas experimentar alteración; recíprocamente, el vidrio permanece inalterado por el paso de la luz. Pero existe una pléyade de vidrios menos familiares que sí responden al paso de la luz y pueden experimentar cambios útiles al ser iluminados. Tales cambios permiten a los fabricantes la producción de dispositivos muy dispares, desde gafas cuyos cristales se oscurecen al recibir la luz solar hasta las cabezas de lectura de los discos de memoria magnética utilizados en los ordenadores. Entre las potenciales aplicaciones sugeridas por las investigaciones se cuentan ventanas auto-oscurecidas para edificios, cristales especiales para ciertas dolencias oculares y conectadores para circuitos integrados. El vidrio ha encontrado usos que mal podrían haber sido imaginados hace cuatro milenios.

Estos vidrios especiales se dividen en dos categorías: fotocrómicos y fotosensibles. Los primeros cambian temporalmente de color al ser expuestos a una luz intensa. Los vidrios fotosensibles desarrollan una "imagen latente" invisible; un tratamiento térmico posterior permite el revelado de esta imagen, dando por resultado cambios permanentes de color o de estructura —o ambas cosas— en el vidrio.

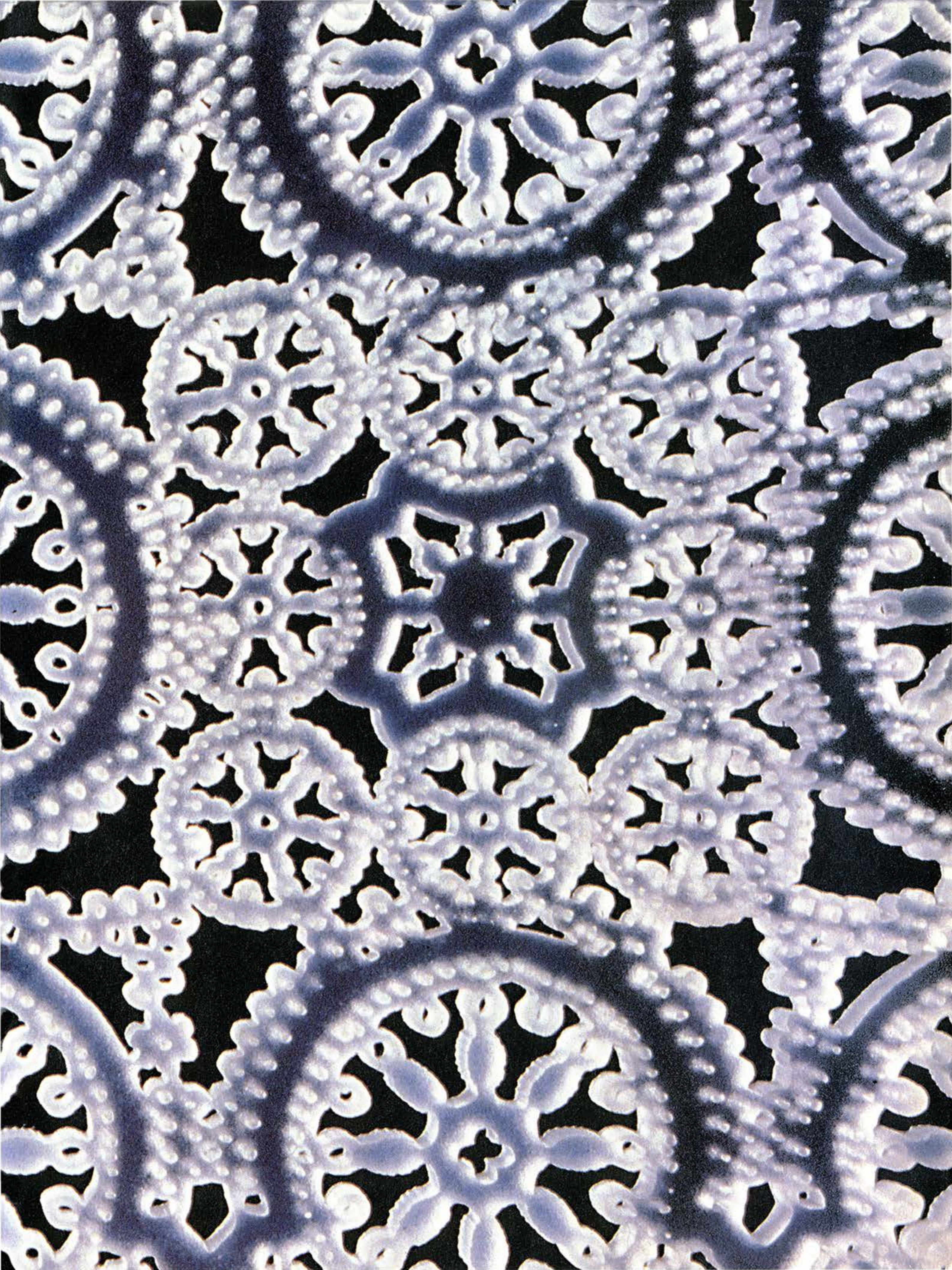
Los procesos químicos subyacentes a estos vidrios facilitan la manufactura, a la medida, de piezas sumamente intrincadas destinadas a aplicaciones industriales, y permiten hacerlo con eficiencia de producción en masa. Dado que los vidrios se "mecanizan" químicamente, las tolerancias son mucho menores que las de las piezas talladas o perforadas por medios mecánicos; las perforaciones pueden ser tan diminutas, que resultaría imposible enfilar a través de ellas un cabello. Por si fuera poco, los vidrios fotocrómicos y fotosensibles son estables, inertes, impermeables, fuertes y aislantes de la electricidad, amén de ofrecer ventajas estructurales sobre plásticos y metales.

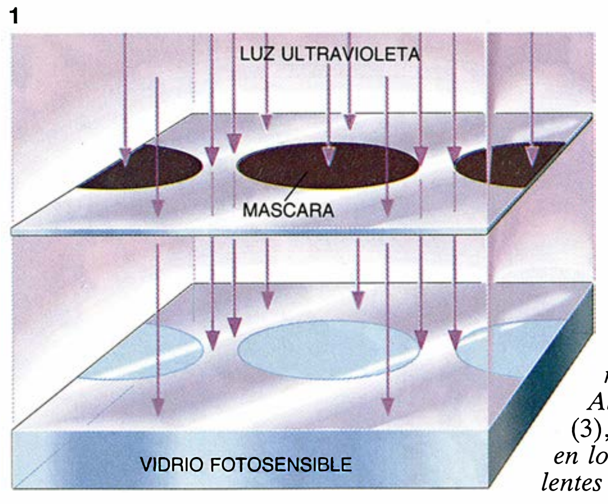
Se está buscando métodos para refinar sus características y para desarrollar aplicaciones comerciales. Se arranca, para ello, de principios químicos que se establecieron ya en los años cuarenta. En aquellos trabajos

DONALD M. TROTTER, JR., es técnico titulado superior dedicado a investigación en la compañía Corning. Además de trabajar en vidrios fotocrómicos y fotosensibles, ha dedicado varios años a la experimentación de condensadores experimentales, que describió en el número de septiembre de 1988 de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA.



1. OBJETO DECORATIVO de vidrio fotosensible, que vemos ampliado unas cuatro veces su tamaño real, formado al bañar con luz ultravioleta las zonas no protegidas por una máscara. Tras un tratamiento térmico, dichas zonas se tornan opalinas; se las ataca después con ácido fluorhídrico. El ácido también muerde al vidrio, proporcionándole aspecto escarchado.



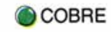


2. LAS MICROLENTICULAS se fabrican a partir de vidrio fotosensible. Las regiones opalinas se contraen por exposición a luz ultravioleta (1) *acompañada de tratamiento térmico* (2), *tornándose más densas que el vidrio del cual nacieron. Al oprimirlas, las regiones vítreas se abomban, formando lentes* (3), *que han encontrado aplicación en las cámaras fotográficas y en los elementos ópticos de máquinas de transmisión facsímil. Las lentes de la microfotografía* (4) *tienen unas 100 micras de diámetro.*

preliminares, S. Donald Stookey y otros científicos de la empresa Corning Glass Works (convertida hoy en Corning, Inc.) habían tomado vidrio ordinario y comenzaron a experimentar con él, aportándole aditivos químicos. Stookey creó familias de vidrios que reaccionan a la luz cambiando de color o formando una imagen latente. Tanto éxito tuvieron los procesos químicos básicos por él elaborados, que todavía siguen usándose.

Al igual que muchos vidrios corrientes, los cristales fotocrómicos y fotosensibles consisten predominantemente en dióxido de silicio, el constituyente principal de la arena de playa. Sin embargo, el dióxido de silicio resulta difícil de manipular. Su punto de fusión es muy elevado (más de 1600 grados centígrados) y en tal estado es viscoso en extremo. Para reducir la temperatura de fusión y crear un producto fundido más fluido, se agrega, a la hornada de vidrio, óxidos de elementos alcalinos y alcalino-térreos. Se añaden óxidos de aluminio, boro, titanio y otros metales para controlar el índice de refracción, resistencia a la intemperie y resistencia a los esfuerzos. Tales óxidos afectan

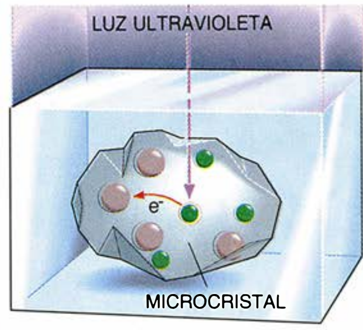
Funcionamiento de los vidrios fotorreactivos



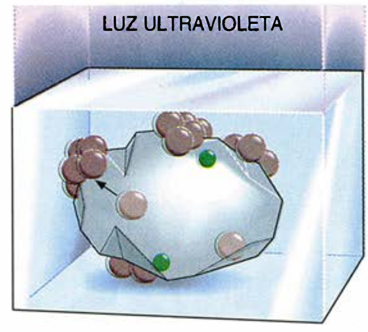


CERIO

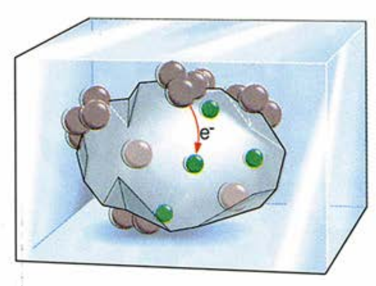
VIDRIOS FOTOCROMICOS



Los microcristales de haluro de plata dopado con cobre se hallan presentes por todo el cristal. La luz ultravioleta hace que el cobre done un electrón (e⁻), que es capturado por un ion de plata.

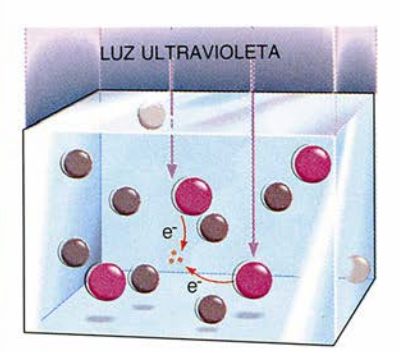


Los iones de plata, neutralizados, se agregan formando diminutas motitas. Estas motitas absorben la luz visible y oscurecen al vidrio.

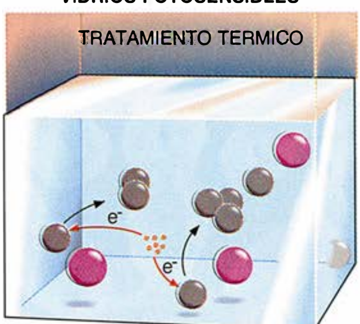


Al cesar la iluminación, el cobre recupera sus electrones. Las motitas de plata se reconvierten en microcristales de haluro, no absorbentes, y el vidrio se torna claro.

VIDRIOS FOTOSENSIBLES



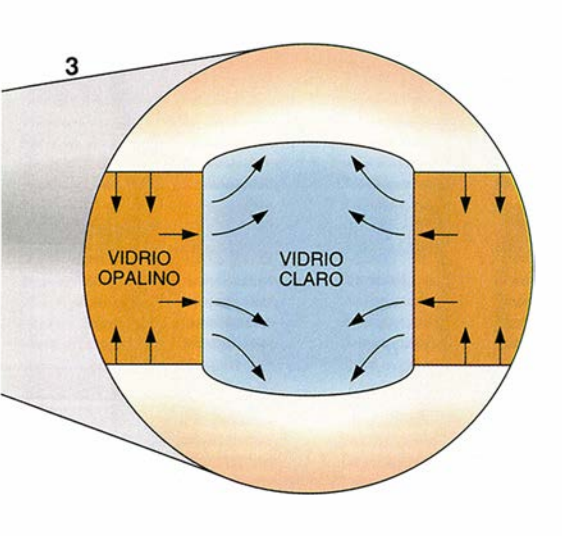
La irradiación ultravioleta libera electrones de un donante, como puede ser el cerio. Los electrones quedan atrapados en ciertos puntos del vidrio.

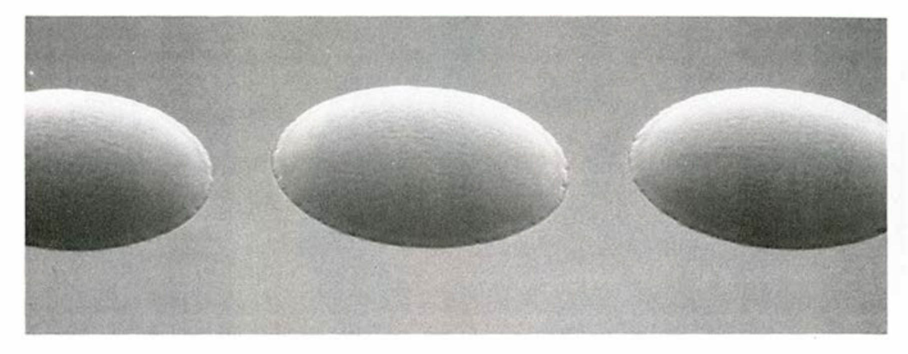


El tratamiento térmico libera los electrones de los puntos de captura. Los electrones reducen los iones de plata; los átomos de plata neutra se agregan en motitas.



Al proseguir el tratamiento térmico, se forman cristales de metasilicato de litio o de fluoruro de sodio. Las regiones donde se desarrollan se tornan de un ópalo oscuro.





a la ordenación y coordinación de las moléculas en el vidrio.

Para proporcionar a este vidrio base sus propiedades fotocrómicas o fotosensibles hay que aportar un pequeño número de otros elementos. Los aditivos reaccionan o precipitan en respuesta a la iluminación y el calentamiento. El vidrio base afecta a las propiedades de los vidrios fotocrómicos o fotosensibles resultantes, influyendo en la composición de las partículas precipitadas o en la velocidad de reacción.

Para fabricar un cristal fotocrómico se parte de una mezcla de vidrio base que tenga un contenido bastante alto de óxido bórico. Se añaden cobre y plata en forma de nitratos o cloruros, así como un haluro metálico, esto es, un compuesto formado por un metal y un halógeno, que puede ser flúor, cloro, bromo o yodo.

La hornada se calienta a una temperatura de unos 1200 grados centígrados, punto en el que se funde y convierte en un fluido homogéneo cuya consistencia es la de una jalea espesa. Se vierte entonces en moldes el vidrio fundido y el líquido se prensa para conferirle diversas formas, por ejemplo, discos ligeramente convexos que, pulidos, serán cristales de gafas. El molde enfría y solidifica al vidrio, que se endurece y conserva su forma.

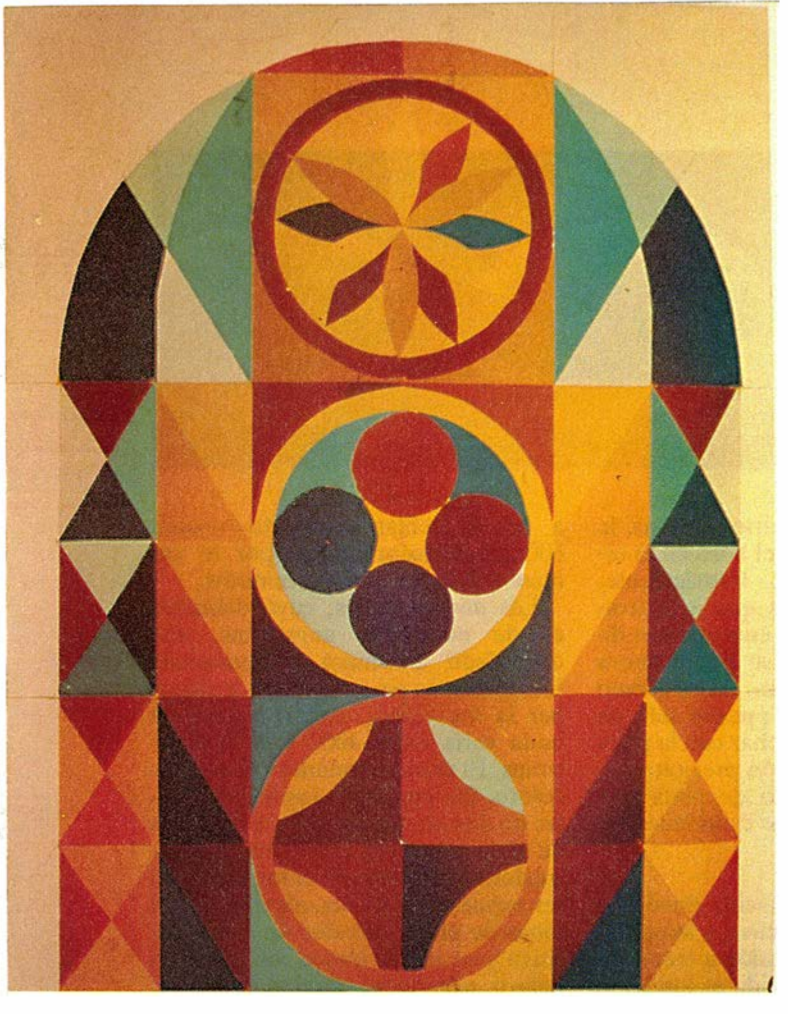
Al enfriarse el vidrio, cambia la forma en que encaja el boro en la estructura vidrio-base. Consiguientemente, los halógenos que a la temperatura de fusión se encontraban disueltos en el vidrio se hacen ahora mucho menos solubles. El resultado es que los halógenos pueden salir de la disolución y reaccionar con la plata y el cobre. La reacción precipita microcristales de haluro de plata que contienen minúsculas cantidades de cobre.

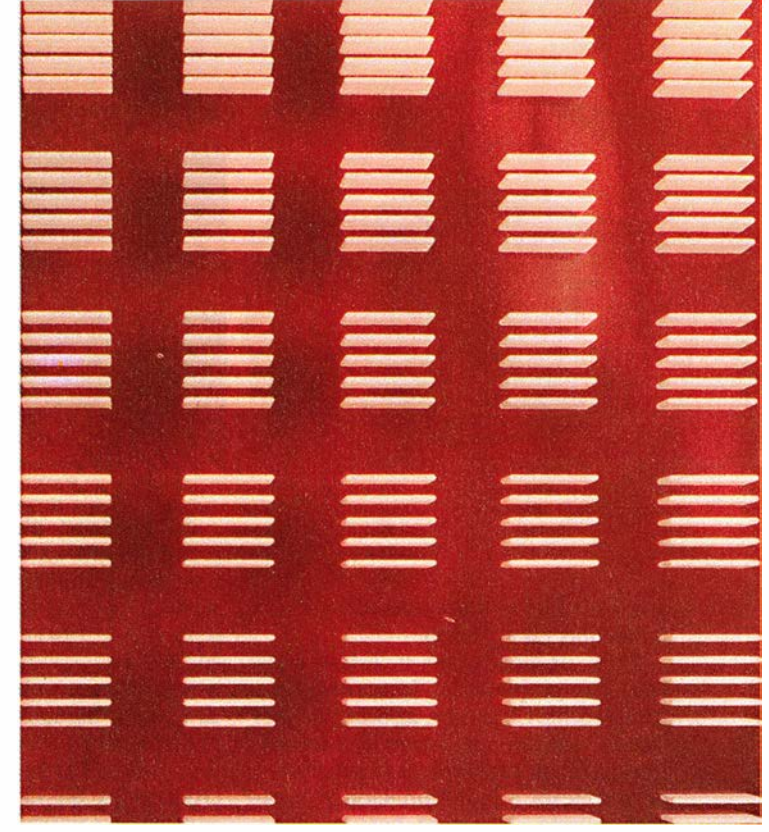
Aunque la precipitación puede en principio producirse a temperatura ambiente, la difusión a través de la matriz de vidrio rígido es tan lenta que habrían de transcurrir miles de años antes de que se llegasen a formar microcristales. En vez de eso, se provoca una precipitación rápida por revenido, y se torna a calentar el vidrio hasta una temperatura algo inferior a la de reblandecimiento —unos 600 grados centígrados, por lo común— durante unos 30 minutos.

Los microcristales, cuyo diámetro es de unos 100 angstroms, son demasiado diminutos y demasiado transparentes para dispersar o absorber la luz visible, cuya longitud de onda varía entre 4000 y 7000 angstroms. El vidrio permanece claro e incoloro. Sin embargo, los microcristales no son transparentes a longitudes de onda menores y absorben la luz ultravioleta presente en la luz solar. Al ser expuestos a tal luz, algunos de los iones de plata, dotados de carga positiva y en enlace iónico con los iones haluro, negativos, adquieren un elec-

3. BANDEJA DE VAJILLA de vidrio fotosensible. La exposición a luz ultravioleta y al calor ha provocado el crecimiento de motas aciculares de plata sobre un precipitado anterior de cristales de fluoruro y bromuro sódicos. Las acículas de plata absorben una estrecha banda del espectro luminoso, confiriendo con ello color al vidrio. Las variaciones de exposición afectan a la cantidad de plata depositada e influyen en el tamaño de las acículas; por este motivo vemos sobre la bandeja colores diferentes.







4. APLICACIONES de los vidrios fotosensibles. Suelen emplearse para vajillas, adornos y complementos o figuras artísticas (izquierda). *En arquitectura se ha propuesto la utilización de celosías de una pieza para control de la iluminación con anchuras de unos tres milímetros* (centro, izquierda), *creadas por dopado de vidrio claro con un adi-*



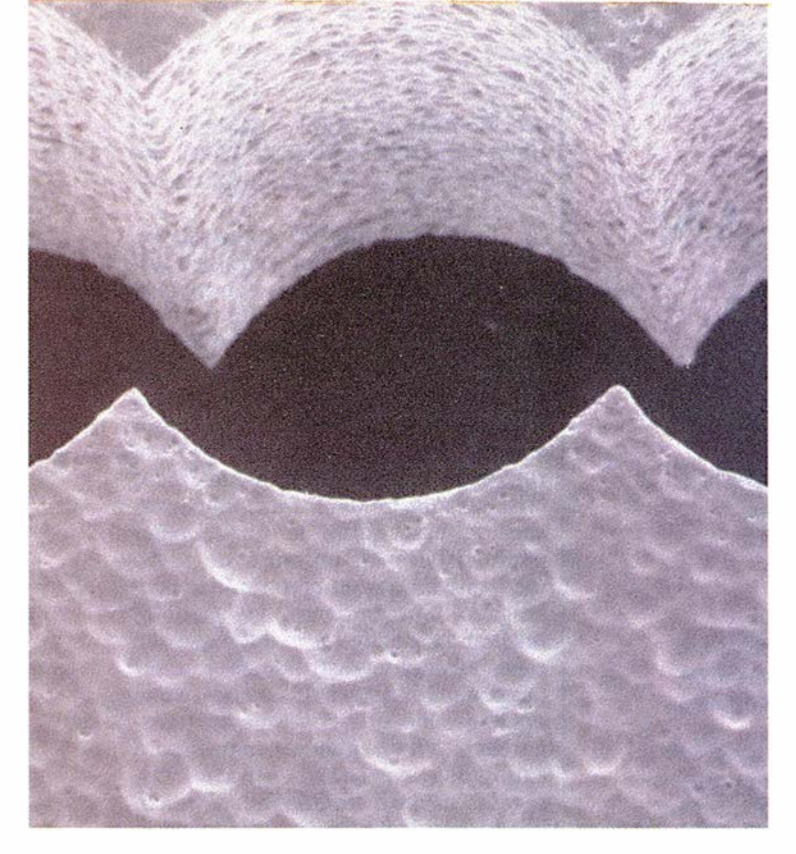
trón cedido por un ion de cobre y se convierten en átomos neutros.

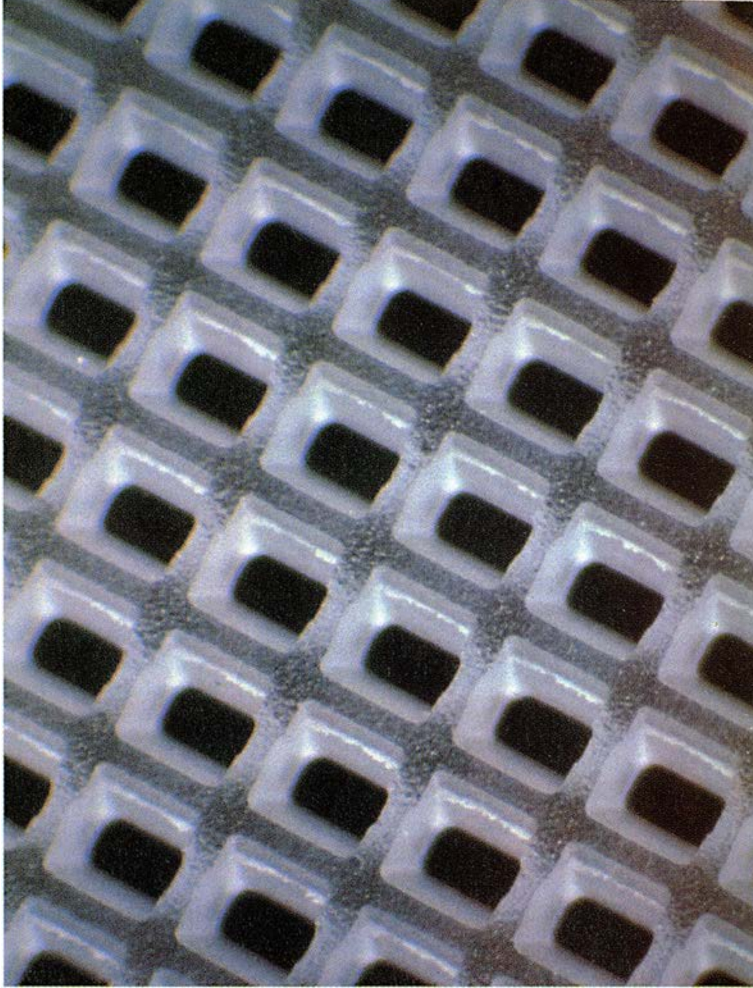
Centenares o miles de estos átomos de plata neutros se apiñan y forman minúsculas motitas de plata metálica. Aunque estas motitas siguen siendo demasiado pequeñas para dispersar la luz visible, sí alcanzan a absorberla. Como las motitas que se han formado tienen toda clase de formas y tamaños, todas las longitudes de onda resultan igual de bien absorbidas. En consecuencia, el cristal se oscurece y toma un color grisáceo. Al cesar la iluminación, los iones de cobre recuperan los electrones que cedieron, las motitas de plata metálica vuelven a convertirse en haluro de plata y el cristal se destiñe rápidamente y retorna a su estado incoloro original. Dado que los microcristales nada pierden a lo largo del proceso, el cristal puede oscurecerse y decolorarse miles de veces sin degradación.

Las mejoras conseguidas durante la década de los setenta en las velocidades de oscurecimiento y decoloración dieron ocasión a aplicaciones comerciales, sobre todo para gafas de sol. La investigación reciente se ha centrado en la cocción de los vidrios con hidrógeno. Tal cocción en un medio reductor produce motitas de plata permanentes, que tiñen al vidrio de color intenso. El color concreto queda determinado por la duración y la temperatura de la cocción. Las lentes de algunas gafas así construidas pueden minimizar la distorsión de color durante el día y preservar la visión por la noche. Otras poseen características espectrales que, se dice, mejoran la agudeza visual y alivian las molestias de quienes sufren retinitis pigmentosa, una enfermedad degenerativa del ojo, así como otras disfunciones oculares que provocan fotofobia.

Se trabaja también en la aplicación de vidrios fotocrómicos a la arquitectura y la fabricación de lunas de automóvil, pero se tropieza aún con ciertas dificultades. Por ejemplo, los vidrios propenden a mostrar sensibilidad a la temperatura ambiente. En consecuencia, los cristales fotocrómicos adquieren un tinte más oscuro en los días fríos que en los cálidos, lo que produce condiciones desiguales de iluminación en el interior.

5. LOS VIDRIOS FOTOCROMICOS encuentran utilidad primaria en gafas que se oscurecen por efectos de la luz solar. En este caso, sólo una de las lentes ha sido expuesta a luz ultravioleta.





tivo (fluoruro sódico). Estos vidrios encuentran aplicación más corriente en los canales de vitrocerámica (de 0,38 mm de diámetro y una tolerancia de 0,01 mm), que alinean las agujas de las impresoras matriciales (centro, derecha) *y para láminas celulares que ayudan a separar los píxeles iluminados en pantallas de plasma* (derecha).

Contrariamente a los fotocrómicos, los vidrios fotosensibles experimentan cambios permanentes. También son iones de plata los responsables de los efectos fotoquímicos, lo mismo que antes. Pero en los cristales fotosensibles, el metal que se utiliza como donante de electrones para la plata suele ser cerio en vez de cobre, aunque en teoría muchos otros elementos podrían servir a tal propósito. Cuando iluminamos el vidrio con luz ultravioleta, algunos de los iones de cerio liberan un electrón. Los electrones liberados por el cerio quedan atrapados en lugares específicos del vidrio, formando una imagen latente.

Desconocemos la naturaleza de los puntos de captura, que parecen hallarse presentes por doquier en el material. También los vidrios fotocrómicos los presentan, pero en éstos, a diferencia de los correspondientes a los fotosensibles, los iones de plata de los microcristales de los vidrios fotocrómicos son más eficientes en la adquisición de electrones que los situados en los puntos de captura.

De ello se infiere la necesidad de un tratamiento térmico, en los vidrios fotosensibles, para liberar a los electrones de las trampas en que se encuentran; los electrones pueden entonces combinarse con los iones positivos de plata, dispersos por todo el material. El calentamiento permite que los átomos de plata neutra resultantes se apiñen unos junto a otros. Los minúsculos grumos de metal sirven de núcleos de precipitación de aditivos aportados al vidrio, como el metasilicato de litio. Cuando se forma cierto número de cristales, el vidrio se torna de color opalino, translúcido u opaco. Las regiones que no fueron expuestas a la luz ultravioleta se conservan transparentes y de aspecto cristalino.

Los vidrios fotosensibles han pasado a ser algo más que un nuevo medio fotográfico. En los años ochenta, Nicholas F. Borrelli y David L. Morse, de Corning, hallaron que el proceso químico puede llevar a la manufactura de microlentículas. Debido a que el metasilicato de litio es por lo general más denso que el vidrio a partir del cual se forma, las regiones opalinas se contraen con respecto a las regiones cristalinas. El efecto se produce mientras el vidrio es calentado hasta su punto de reblandecimiento; el vidrio se deforma para adaptarse a la contracción. Por manipulación cuidadosa de la temperatura y de la exposición a rayos ultravioletas se controla la deformación de las regiones vítreas y se regula la potencia óptica de las lentes.

En 1984, Dennis W. Smity y el autor descubrieron que las diferentes propiedades de ópalo y vidrio permitían la formación directa de circuitos eléctricos en el seno del vidrio. La inmersión de una muestra provista de una configuración opalina en un baño de sal fundida que contenga iones de plata, seguida de calentamiento en atmósfera de hidrógeno, crea la formación de una película conductora de plata metálica sobre las regiones opalinas. En cambio la película que se forma sobre las regiones vítreas sigue siendo no conductora. Este fenómeno está todavía por explotar comercialmente, pero es posible que encuentre aplicación, por ejemplo, en la interconexión de circuitos integrados.

Los vidrios fotosensibles pueden adoptar configuraciones sumamente minuciosas y complejas: en ornamentación y como elementos espaciadores en tubos fotomultiplicadores, láminas celulares en pantallas de plasma, placas de carga y boquillas de proyección de las impresoras de chorro de tinta. El metasilicato opalino es mucho más atacable por ácidos que el vidrio a partir del cual se forma; por eso, al sumergir una muestra en un baño de ácido fluorhídrico diluido,

se eliminan las regiones opalinas. El proceso permite producir piezas de vidrio complejas y de alta precisión.

Al utilizar el fluoruro sódico se obtienen efectos fotosensibles distintos de los conseguidos con metasilicato de litio. Al mezclar fluoruro de sodio con bromuro sódico resulta posible generar en el cristal tonos intensos de todos los colores del espectro.

El tratamiento térmico inicial provoca la formación de cristales de fluoruro sobre los núcleos de plata. Estos cristales, que tienen forma cúbica, sirven de base sobre la que acrecer microcristales de bromuro de sodio mediante un tratamiento térmico prolongado. Sin embargo, los cristales resultantes tienden a mantenerse tan espaciadamente distribuidos y a ser tan pequeños que el vidrio no se torna opalino, sino que conserva su transparencia. Una segunda y más intensa exposición a los rayos ultravioletas, seguida de otro tratamiento térmico, libera cantidades adicionales de plata. Esta precipita sobre los ápices de las pirámides de bromuro, formando largas motas aciculares, de suficiente tamaño para absorber luz visible. Todas las acículas son similares; por consiguiente, absorben una banda francamente estrecha de longitudes de onda y confieren al cristal un color brillante. Por variación de la intensidad de ultravioletas se consiguen acículas de plata de diferentes dimensiones, con lo que aparecen a través del vidrio muchos colores. Podemos hallar estos vidrios fotosensibles de color en filtros ópticos, vajillas y objetos decorativos.

Sus propiedades de impermeabilidad, dureza, inercia química, refracción óptica y aislamiento eléctrico confieren a los vidrios, sean fotocrómicos o fotosensibles, características de utilidad únicas. Desde su invención han demostrado constituir la solución ideal para una pléyade de problemas tecnológicos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FULL-COLOR PHOTOSENSITIVE GLASS. S. Donald Stookey, George H. Beall y Joseph E. Pierson en *Journal of Applied Physics*, vol. 49, n.° 10, págs. 5114-5123; octubre de 1978.

DISCONTINUOUS/CONTINUOUS METAL FILMS GROWN ON PHOTOSENSITIVE GLASS. D. M. Trotter, Jr., y D. W. Smith en *Applied Physics Letters*, vol. 45, n.° 1, págs. 112-114; 1 de julio de 1984.

PHOTOCHROMATIC GLASSES. R. J. Araújo y N. F. Borrelli en *Optical Properties of Glass*. Dirigido por D. R. Uhlmann y N. J. Kreidl. Academic Press, 1990.

Dinosaurios a la carrera

¿Se desplazaban estos gigantes del Mesozoico lenta y pesadamente o corrían en estampida? Técnicas basadas en la física y en la ingeniería modernas pueden darnos la respuesta

R. McNeill Alexander

Los elefantes no corvetean ni saltan como las gacelas. No se lo permite su tamaño. Imagínese el lector cómo debieron haberse desplazado los dinosaurios, algunos de ellos mucho más pesados que esos proboscídeos. Quizá sus patas eran demasiado débiles para soportar tan enorme peso, de modo que vivían en lagos y dependían del agua para poder flotar, según invitan a creer ilustraciones antiguas. O quizá sus extremidades poseían vigor suficiente para sostenerlos y andaban y corrían como los elefantes (o alguno de los animales modernos más atléticos), a pesar de su tamaño.

Puesto que se han extinguido, no podemos apelar a la observación directa para confirmar ni refutar ninguno de esos cuadros alternativos, pero pueden obtenerse respuestas bastante convincentes mediante la aplicación de métodos tomados de la física y de la ingeniería. Las técnicas de la construcción naval, el estudio de las fuerzas y de las tensiones en estructuras y esqueletos y la observación directa de los animales en la naturaleza nos ayudarán a entender algunas de las leyes físicas que pudieron haber gobernado el movimiento de los dinosaurios.

Podemos combinar este enfoque mecánico con lo que nos enseña el registro fósil sobre sus huesos y pisadas, para acercarnos a descubrir la agilidad, o la indolencia, de estos gigantes desaparecidos. El cuadro que surja podrá decirnos si *Triceratops* (cornudo y cuadrúpedo) galopaba o arrastraba los pies y si *Tyrannosaurus* (bípedo rey de los carnívoros) podía maniobrar mejor y correr más que *Triceratops*, su presa.

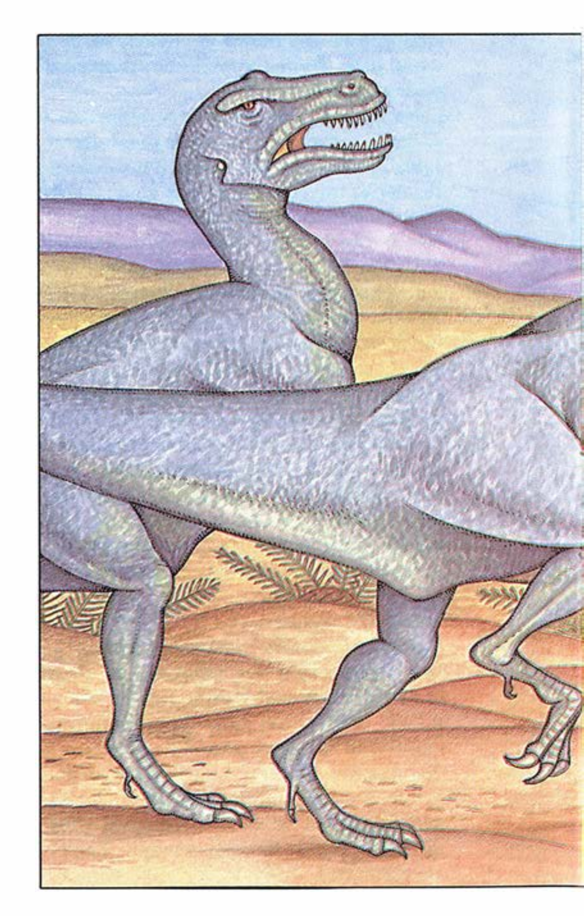
R. McNEILL ALEXANDER enseña zoología en la Universidad británica de Leeds. Investiga y escribe acerca de la mecánica del movimiento humano y animal; le interesan, en particular, la carrera y el salto, que estudia mediante análisis de filmaciones, medición de fuerzas y modelos matemáticos.

Nuestro conocimiento de los dinosaurios se apoya, de manera principal, en sus esqueletos, a partir de los cuales medimos su talla y longitud. Pero esta información del esqueleto no nos revela cuánto peso tenía que soportar; sus patas, en concreto. Como tampoco las medidas de longitud y altura nos ayudan a hacer comparaciones entre especies de morfología distinta. Carecemos, por desgracia, de la magnitud que suele ser de mayor utilidad en esas medidas de tamaño: la masa corporal.

El peso de los dinosaurios vivos se lo repartían, en buena medida, la piel, la carne y las entrañas, y ésas hace mucho tiempo que se pudrieron; sólo nos cabe, pues, estimar su masa corporal. Cálculos que pueden hacerse midiendo modelos a escala tal como se piensa que eran; muchos museos venden modelos de plástico adecuados.

De acuerdo con el principio de Arquímedes (sumergir un cuerpo en el agua y medir el volumen que desplaza), podemos determinar el volumen de nuestros dinosaurios de plástico. Podemos ir ajustando luego esa medida hasta aproximarla al volumen real de los dinosaurios de carne y hueso. Algunos modelos están hechos a una escala de 1:40; su volumen habrá de multiplicarse por 40 × 40 × 40 (longitud por altura por anchura), es decir, 64.000, para obtener el volumen de los dinosaurios verdaderos. Multiplicando, a su vez, este volumen asombroso por 1000 kilogramos por metro cúbico (la densidad del agua y, aproximadamente, de los cocodrilos y los mamíferos), se obtiene la masa probable de los dinosaurios.

Estas medidas sugieren una masa de más de siete toneladas para *Tyrannosaurus*, el mayor dinosaurio carnívoro que se conoce. Este peso es 10 veces el de un macho de oso polar adulto, el mayor depredador terrestre moderno. *Brachiosaurus*, el mayor dinosaurio herbívoro del que existe un esqueleto razonablemente completo, superaba ese techo, con la cincuentena de toneladas que se le atribuyen, 10 veces la masa de un macho adulto de elefante africano y aproximadamente equivalente a la de un cachalote promedio. Aunque *Brachiosaurus* constituía un ejemplar impo-



1. *TYRANNOSAURUS*, un carnívoro, persigue a *Triceratops*, herbívoro tricorne. ¿Se trataba de una persecución rápida y ágil? ¿Era tal vez un acoso que procedía con pesadez y lentitud?

nente, que se alzaba a una altura de 13 metros, es decir, unas dos veces la altura de una jirafa adulta, quizá no fuera el de mayor tamaño. *Supersaurus* y *Ultrasaurus*, conocidos sólo a partir de unos cuantos huesos, pudieron ganarle en esas proporciones impresionantes.

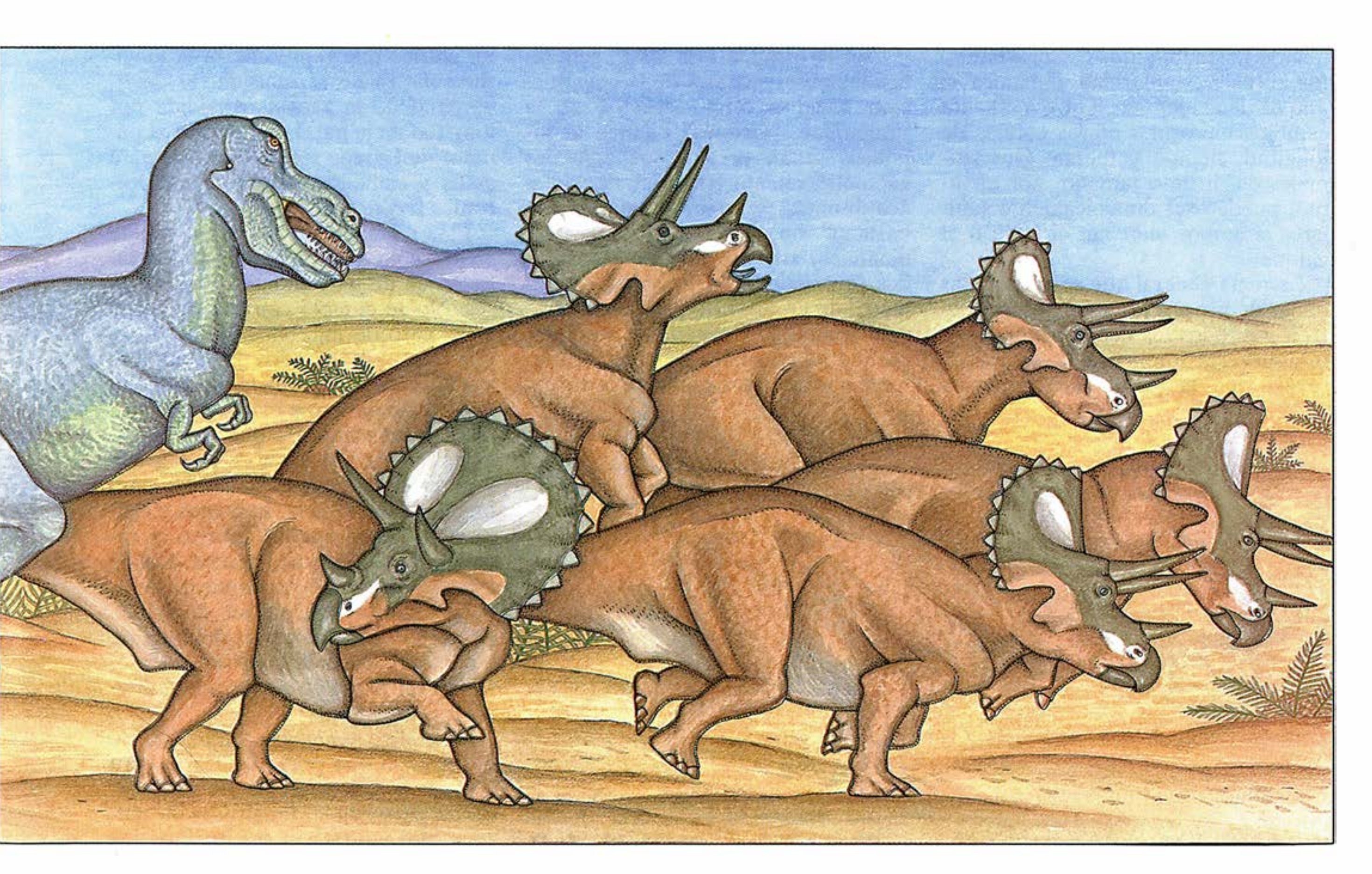
El problema de la sustentación del peso al que deben hacer frente los animales terrestres de talla notable se lo planteó ya Galileo a principios del siglo XVII, cuando especuló sobre la relación entre el tamaño, la resistencia y la estructura. Considérense dos animales de tamaños distintos y geométricamente similares (lo que significa que, si el mayor es, por ejemplo, dos veces más largo que el menor, le doblará también en anchura y altura). En este caso, el animal mayor tiene dos (longitud) por dos (altura) por dos (anchura), es decir, ocho veces el volumen del menor ($2 \times 2 \times 2 = 8$). Y si suponemos que ambos están hechos de las mismas sustancias, el organismo mayor pesa ocho veces más que su contrapartida menor.

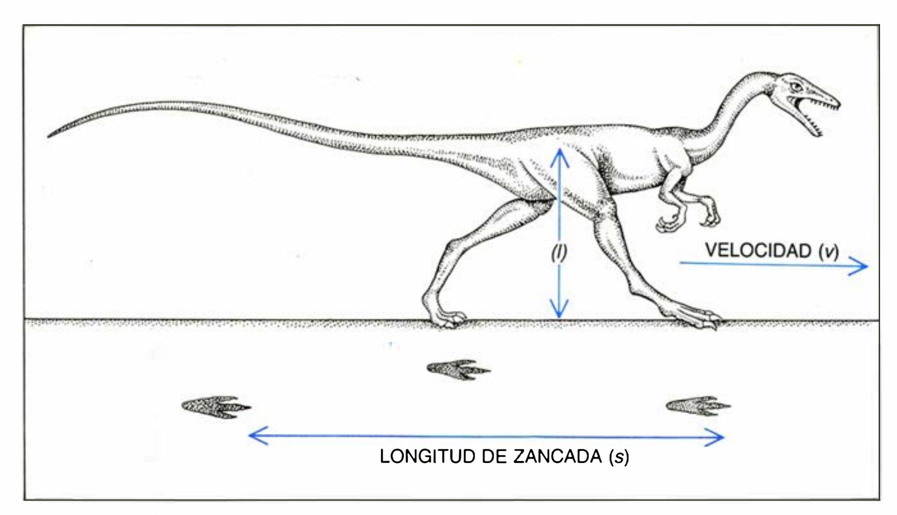
Pero hay un problema. Aunque el volumen del grande es ocho veces mayor, la resistencia de sus patas aumenta sólo por un factor de cuatro. Ahora bien, la resistencia de la pata es proporcional a la superficie de la sección transversal de la extremidad; por consiguiente, una pata sería sólo dos (longitud) por dos (anchura), es decir, cuatro veces más fuerte. (Un aumento en altura no tendría efecto sobre la sección transversal.) En otras palabras, un peso óctuple tendría que transportarse con una resistencia sólo cuádruple. De ese modo, y lo vio ya Galileo, si un animal fuera creciendo sin cambiar de forma, acabaría por alcanzar un tamaño cuyo peso sería incapaz de soportar.

Para aplicar esta información sobre la sustentación del peso al movimiento de los dinosaurios precisamos conocer qué sucede con los animales que nos rodean, en particular en lo que concierne a los efectos de las diferencias de tamaño en su movimiento. Desde hacía varios años, me venía dedicando a la investigación de la mecánica de la carrera y el salto en ranas, perros, canguros y otros animales, cuando fui invitado a dictar una conferencia sobre el impacto del tamaño en la locomoción animal. Me dispuse, pues, a desarrollar una teoría de la carrera y su relación con las diferencias de tamaño. No tardé en advertir la recurrente presencia de una expresión en mis ecuaciones. Se trataba de v^2/gl, donde v designa la velocidad a la carrera, g simboliza la aceleración de la gravedad (9,8 metros por segundo al cuadrado) y l es la longitud de la extremidad. En esa fórmula algebraica se encerraba la clave que nos habría de permitir establecer la capacidad atlética de los dinosaurios y calcular su velocidad a la carrera.

Aunque al principio no me di cuenta de ello, v^2/gl caía dentro de un grupo de expresiones que comenzó a usar William Froude, ingeniero naval del siglo pasado. Froude quería estimar la potencia necesaria para propulsar barcos de nuevo diseño, ensayando con modelos a escala reducida antes de empezar a construir el propio buque. (Y, con ello, ahorrarse costosos errores.) Puesto que la principal resistencia que ha de vencer la nave la opone la ola de proa que le sale al frente, vio que la altura de la ola de proa de su simulación debía ser proporcional a la de una ola real contra la proa de un barco auténtico. Demostró que, para conseguir ese tamaño de ola, el modelo tenía que trabajar a una determinada velocidad; así nació una expresión que, en su honor, recibe el nombre de número de Froude.

En el ámbito de la construcción naval, para que la prueba sea útil el número de Froude (v^2/gl) del modelo ha de coincidir con el número de Froude del barco real que se desplaza a su velocidad normal. Obviamente, en los cálculos de Froude l denotaba el casco del buque, no la longitud de la pata.





2. LONGITUD DE LA ZANCADA, es decir, la distancia entre dos huellas sucesivas del mismo pie. En la ilustración, *Compsognathus*, un carnívoro del tamaño de un pollo actual.

El experimento de Froude ilustraba un caso especial de una regla más general (si no hubiera sido así, no me habría servido, puesto que los barcos no se parecen mucho a los dinosaurios). La regla lleva implícita la noción de similaridad dinámica, que puede considerarse una generalización del concepto de similaridad geométrica. Según vimos, dos formas son geométricamente similares si una puede, mediante un cambio uniforme en la escala de longitud, convertirse en idéntica a la otra. (Altura y anchura deben, lógicamente, aumentarse en proporción.) Y siguiendo en esa línea de razonamiento, dos movimientos ofrecen similaridad dinámica si uno deviene idéntico al otro mediante cambios uniformes en las escalas de longitud, tiempo y fuerza. Dos animales de distinto tamaño, por ejemplo, pueden ser dinámicamente similares si ambos marchan al trote o al galope.

La regla general que se aplica a las ondas de proa, a los animales que corren y a todos los demás sistemas en los que está implicada la gravedad, revela que la similaridad dinámica sólo es posible si coinciden los números de Froude. Atendamos a la energía de estos sistemas para mayor claridad. En la subida y bajada de una ola, o de una extremidad, la energía pasa una y otra vez de su forma cinética a su forma potencial, y viceversa. Dos sistemas serán dinámicamente similares si y sólo si poseen la misma relación entre energía cinética (igual a $1/2\ mv^2$ para un cuerpo de masa m que se mueva a la velocidad v) y energía potencial (igual a mgh, en la que h es la altura). Esta relación es $v^2/2gh$, proporcional a un número de Froude.

Con la fórmula a la vista, generalicé las observaciones de la construcción naval a otros aspectos de la similaridad dinámica. Planteé la hipótesis según la cual los animales geométricamente similares de tamaños distintos correrían de una manera bastante afín, desde el punto de vista dinámico, siempre que sus velocidades promovieran la igualdad de números de Froude. No podía esperarse una similaridad dinámica absoluta, porque los animales de tamaño diferente no tienen exactamente la misma forma y la similaridad dinámica estricta requiere una similaridad geométrica estricta.

La teoría presentaba validez general. A este propósito, la hipótesis predecía que los animales de tamaño distinto optarían por una marcha parecida cuando su número de Froude fuera igual; y así ocurre: hurones y rinocerontes pasan del trote al galope a velocidades muy diferentes, pero en cada caso el número de Froude es aproximadamente el mismo. Los hurones alteran su paso cuando empiezan a moverse a 1,5 metros por segundo. Puesto que la altura de su cadera es de 0,09 metros, la expresión del número de Froude es 1,5 al cuadrado dividido por 0,09 veces g (o 9,8 metros por segundo al cuadrado). El resultado es 2,55. De manera análoga, un rinoceronte cambia del trote al galope a 5,5 metros por segundo, y la altura de su cadera es de 1,2 metros; cuando se hacen los cálculos, el número de Froude resultante es 2,57.

Otra predicción se refería a la longitud de la zancada, la distancia entre huellas sucesivas del mismo pie. Cuanto más raudos corren los animales, más larga es su zancada. La hipótesis sostenía que, cuando sus números de Froude fueran iguales, animales distintos darían, en virtud de su similaridad dinámica, unas zancadas de idéntica proporción a la longitud de su pata. Expresado de otro modo: un gráfico que representara la longitud relativa de la zancada (es decir, longitud de la zancada dividida por longitud de la pata) en relación al número de Froude sería el mismo, para gatos y camellos, hurones y rinocerontes [*véase la figura 3*].

Esta relación, sin embargo, resulta válida sólo para mamíferos del tamaño de un gato doméstico y mayores. No se cumple con esa pulcritud en el caso de micromamíferos, ratas por ejemplo, que corren de una manera peculiar, agazapada, muy distinta de los mamíferos mayores. El gráfico también muestra que la relación entre longitud relativa de la zancada y número de Froude es similar para bípedos (verbigracia, humanos y canguros) y cuadrúpedos (perros y caballos, por ejemplo), prueba de que estas dos formas de movimiento comparten cierta similaridad dinámica. (Entre la forma de correr del hombre y el movimiento de los cuartos traseros de un pequeño poni no hay diferencias especiales.)

El gráfico tenía más enjundia. Se me ocurrió que podía utilizarlo para estimar la velocidad de los dinosaurios, a partir de las longitudes de zancada que mostraban sus huellas. De

● DIVERSOS CUADRUPEDOS (GATO A RINOCERONTE)
○ HOMBRE (BIPEDO)
△ CANGURO (BIPEDO)

LONGITUD RELATIVA DE ZANCADA (s/l)

NUMERO DE FROUDE (v^2/gl)

3. NUMEROS DE FROUDE en función de la longitud de zancada, en el caso de bípedos (verbigracia, canguros y seres humanos) y de cuadrúpedos (rinocerontes). Los números aumentan de forma logarítmica, por lo que resulta tajante una diferencia entre un número de Froude de 0,1 y de 20.

manera bastante sorprendente, gran número de huellas de dinosaurio han sobrevivido como impresiones en fango que se convirtió en piedra [véase "Huellas de pisadas de animales extintos", de David J. Mossman y William A. S. Sarjeant; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1983]. Tales pistas muestran que los dinosaurios andaban con los pies directamente bajo el cuerpo, como los mamíferos y las aves, no extendidos a cada lado de la columna, a la manera de los reptiles modernos. En consecuencia, la relación entre longitud relativa de zancada y número de Froude para los mamíferos debe ser asimismo de aplicación a los dinosaurios. No sería apropiado, en cambio, estimar la velocidad de los dinosaurios mediante la comparación de estos gigantes con los reptiles modernos.

Las mayores huellas de pisadas conocidas, que corresponden a pies posteriores de 1,3 metros de diámetro, se han encontrado en España. Hay pistas de huellas ligeramente menores en otras partes del mundo. De éstas, las mejor conocidas (que miden de 0,9 a 1,0 metros de diámetro) se descubrieron en Texas; el tamaño y la forma de tales impresiones sugieren que por esta región vagaban saurópodos, enormes herbívoros de largo cuello y larga cola. Bípedos de tres dedos similares a *Tyrannosaurus* dejaron otras huellas en las cercanías. Una pista famosa muestra que estos dos tejanos se encontraron: un saurópodo y un bípedo parecido a un tiranosaurio tomaron la misma ruta [*véase la figura 4*]. ¿Terminó esta dramática persecución en un sacrificio? ¿Avanzaban entre jadeos, lentamente y con dificultad, o corrían como una exhalación, mientras retumbaba la tierra?



4. PISADAS DE DINOSAURIOS: constituyen un valioso registro de longitud de zancada y de velocidad. Un pequeño carnívoro de tres dedos pudo haber perseguido a un saurópodo mayor por ese sendero de Texas. El recorrido fue descubierto por Ronald T. Bird en Paluxy Creek en 1944.

Utilizando números de Froude y longitudes de zancada medidas a partir de estas pistas y otras similares, acometí mis primeros tanteos sobre la velocidad de los dinosaurios. ¿Cómo inferirla? Podía deducir la longitud de la pata a partir del tamaño de las huellas del pie (que vienen a medir aproximadamente la cuarta parte de la longitud de la pata); podía también calcularse la longitud relativa de la zancada. Y una vez establecida la longitud relativa de la zancada, empleé el gráfico para encontrar los números de Froude correspondientes. Conocida la longitud de la pata, calculé luego la velocidad. Sin embargo, es posible que los resultados no sean muy exactos; por una doble razón: los puntos correspondientes a los datos presentan bastante dispersión en el gráfico y estamos empleando datos procedentes de animales modernos para estimar las velocidades de los dinosaurios.

Por lo que se deducía de los cálculos, la velocidad de los grandes dinosaurios no era nada espectacular. Todas las huellas conocidas de saurópodos de cierta talla parecen corresponder a velocidades de un metro por segundo, una marcha lenta en humanos y dolorosamente pausada para animales con patas posteriores de tres metros de longitud. Ninguna de las huellas de grandes dinosaurios bípedos sugiere velocidades por encima de los 2,2 metros por segundo, un paso ligero en la marcha del hombre.

Aunque la mayoría de las huellas de los grandes dinosaurios parecen indicar velocidades de marcha, muchas pisadas de dinosaurios pequeños denuncian un paso a la carrera. Las huellas más rápidas las dejaron en Texas un bípedo que probablemente pesaba poco más de media tonelada, la masa de un caballo de carreras, y otro algo más pequeño. Esos recorridos se crearon a una una velocidad de 12 metros por segundo, que es superior a la máxima de 11 metros por segundo que alcanzan los mejores atletas, pero está muy debajo de las velocidades de competición en el hipódromo, que rondan los 15 o 17 metros por segundo.

Pero la ausencia de huellas de ejemplares descomunales en estampida no demuestra que no pudieran correr, sino sólo que de ordinario andaban, por lo menos sobre las superficies donde las pisadas tienen probabilidades de conservarse. Si el lector saliera a la calle en un día nevado

Resistencia del hueso en animales grandes

	MASA CORPORAL (TONELADAS)	INDICADOR DE RESISTENCIA FEMUR	TIBIA	HUMERO
ELEFANTE AFRICANO (FEMUR, TIBIA, HUMERO)	2.5	7	9	11
BUFALO AFRICANO	0.5	22	27	21
APATOSAURUS	34	9	6	14
DIPLODOCUS	12–19	3–5	SIN DATOS	SIN DATOS
TRICERATOPS	6–9	13–19	SIN DATOS	14–22
TYRANNOSAURUS	7.5	9	SIN DATOS	SIN DATOS

y midiera huellas humanas, vería, a buen seguro, zancadas cortas, indicadoras de velocidad de marcha, pero sería erróneo extraer la conclusión de que el hombre no puede correr. Había, pues, que buscar un enfoque distinto para averiguar de qué modo podrían haberse desplazado los dinosaurios grandes y atléticos cuando se lo proponían.

Cuanto más deprisa corre un animal, mayores son las fuerzas que sus pies ejercen sobre el suelo y más vigorosas han de ser sus patas. Por la razón siguiente: a mayor velocidad, el pie se apoya en el suelo una fracción menor de la zancada, de modo que tiene que ejercer una fuerza punta (el máximo de fuerza que se da mientras el pie está en el suelo) para hacer que toda la zancada se equilibre y soportar el peso del cuerpo. Demos un ejemplo: la fuerza punta sobre un pie humano sube desde el mero peso del cuerpo durante la marcha lenta hasta 3,5 veces el peso corporal en la carrera. Esta y el comportamiento atlético requieren huesos fuertes.

El examen de las fuerzas que ejercen los pies de distintos animales facilitó un mayor conocimiento del movimiento de los dinosaurios. Auxiliado por mis colaboradores he utilizado una placa de fuerza (un panel sensible a la presión incrustado en el suelo) para medir las fuerzas producidas por los pies del hombre, el perro, la oveja y el canguro al caminar, correr, brincar o saltar. Unidos estos resultados a la información aportada por el estudio de películas de animales corriendo y los datos anatómicos, nos permitieron calcular las tensiones que tales movimientos imponen a los huesos de las extremidades.

Con algunos ajustes y extrapolaciones, determinamos también las tensiones a que se someten los huesos de animales salvajes que, como el búfalo, pudimos filmar pero no llevar al laboratorio. Podríamos haber aplicado el mismo enfoque a los dinosaurios para descubrir hasta qué punto habrían sus huesos resistido las tensiones de la carrera; pero el reconstruir sus pautas de movimiento hubiera exigido complicados cálculos y una gran dosis de imaginación. Preferí un sistema más rápido y fácil, basado una vez más en la noción de similaridad dinámica y en las enseñanzas de la ingeniería estructural.

Las fuerzas actúan sobre los extremos de los huesos (en las articulaciones), originando tensiones en la caña. Podemos descomponer esas fuerzas: fuerza axial (F_{ax}), que actúa a lo largo del eje del hueso, y fuerza transversal (F_{trans}), que opera ortogonalmente a dicho eje [*véase el recuadro*]. Considerada por separado, F_{ax} establece una tensión uniforme $-F_{ax}/A$, en la que A es la sección transversal del hueso y el signo menos indica una tensión compresiva. Súmense a esta fuerza las tensiones causadas por F_{trans}. Estas tensiones transversas varían a lo largo del grosor del hueso desde $-F_{trans}x/Z$ en un extremo del hueso hasta $+F_{trans}x/Z$ en el otro. En estas expresiones, x representa la distancia de la sección transversal desde el extremo del hueso, y Z es el módulo de sección, una propiedad geométrica de la sección transversal. (Para quienes se hallen interesados, los manuales de ingeniería explican cómo determinar el módulo de sección.)

Una tensión demasiado grande romperá un hueso. Cálculos para los huesos de las extremidades de animales modernos corredores y saltadores indicaron que la tensión $F_{trans}x/Z$ era por lo general mucho mayor que la tensión F_{ax}/A. Esta diferencia nos dice que las fuerzas transversales suponen una amenaza mucho más seria para los huesos que las axiales: es mucho más fácil romper un palo o un hueso o cualquier otra barra delgada y larga mediante fuerzas transversales que romperlo mediante fuerzas axiales. Por lo tanto, puesto que sólo necesitamos estimas aproximadas de las tensiones que actúan sobre los huesos, podemos ignorar las menos importantes F_{ax} y considerar sólo F_{trans}.

En los animales que corren de manera similar desde el punto de vista dinámico, las fuerzas que actúan sobre los huesos son proporcionales al peso corporal, W, porque los huesos deben soportar dicho peso. Esta regla

rige también para las fuerzas transversales sobre los huesos de las patas: las tensiones que causan ($F_{trans}x/Z$) son proporcionales a Wx/Z.

Imaginemos ahora dos animales, similares aunque de tamaño distinto, cuya marcha se desarrolle de manera parecida desde el punto de vista dinámico. Las tensiones que sufran los huesos de la pata serán menores en el individuo que ofrece los mínimos valores de Wx/Z, señal de que sus huesos poseen vigor suficiente para mayores proezas atléticas que las del otro animal.

Cambiando sólo ligeramente la expresión, podemos llegar a un valor para un indicador de resistencia que se presta a un uso más directo: el recíproco Z/Wx. Así, cuanto mayor sea el valor de Z/Wx para los huesos del animal, más atlético podemos imaginárnoslo. Para ser aún más precisos, podemos utilizar Z/aWx, donde a es la fracción de peso corporal que aguantan las extremidades anteriores o las posteriores, según corresponda. La inclusión de esta distribución de peso nos permite hacer comparaciones de interés entre elefantes y *Apatosaurus* (un brontosaurio herbívoro corpulento), por ejemplo; los elefantes apoyan la mayor parte de su peso sobre las patas delanteras y *Apatosaurus* sobre las traseras.

Una vez hubimos determinado un indicador de resistencia para los principales huesos de las patas de grandes mamíferos y dinosaurios, llegamos a la conclusión de que estos imponentes reptiles pudieron competir en agilidad atlética con nuestros mamíferos dotados de indicadores de resistencia similares. Fundábamos esta conclusión en la hipótesis según la cual los huesos de animales distintos podían soportar parejas tensiones. Lo que se comprobó cierto a grandes rasgos con los experimentos realizados con muestras de huesos de aves y mamíferos. Lo que no pudimos fue extender el ensayo a los huesos de dinosaurios: sus propiedades se han alterado en los procesos de descomposición y fosilización.

La idea de que los indicadores de resistencia altos implican agilidad dependía, asimismo, de otra hipótesis, la que suponía que la evolución ha ajustado la resistencia de los huesos de animales diferentes para suministrarles idénticos factores de seguridad. Entiéndase por factor de seguridad de una estructura la fuerza necesaria para romperla, dividida por la máxima fuerza que habrá de actuar sobre dicha estructura en su funcionamiento normal. (Los ingenieros se curan en salud y prefieren diseñar estructuras con factores de seguridad de dos o más para alejar la probabilidad de fracaso de las mismas.)

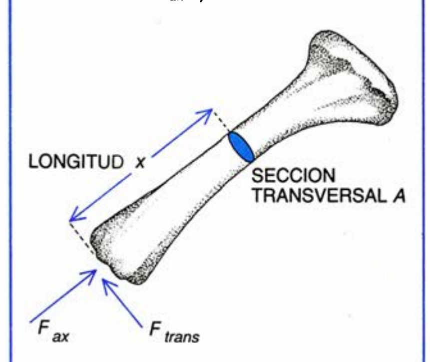
Para llegar hasta los valores de los indicadores de resistencia concernientes a los dinosaurios, hemos de seguir un proceso menos directo que el que nos condujo a las conclusiones. Se comienza por calcular el valor del módulo de sección, o Z, de sus huesos. Paso para el que necesitábamos mediciones cabales de las secciones transversales a distancias conocidas, x, del extremo de los huesos. (El módulo de sección, aunque de obtención complicada, atiende sólo a las superficies de todas las partes de la sección transversal y sus distancias desde la parte media del hueso, o viga.) Extraje valores de x a partir de los minuciosos dibujos publicados por los primeros paleontólogos.

Para que el cálculo de los indicadores de resistencia fuera completo, ya sólo me quedaba conocer el peso, W, del dinosaurio, y, si era un cuadrúpedo, la fracción, a, de este peso sostenida por cada par de patas. (Antes expliqué la forma de estimar el peso de esos reptiles a partir del volumen de los modelos.)

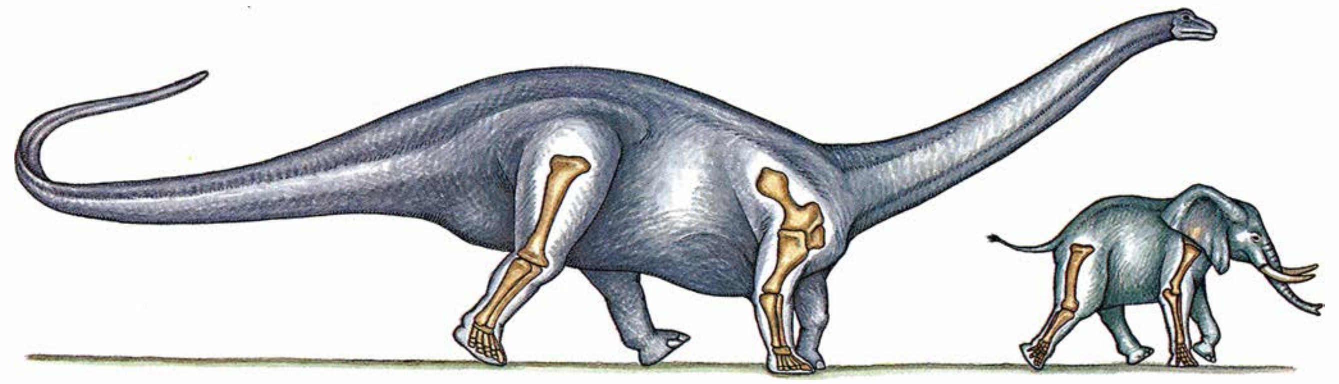
Para calcular la distribución de peso entre las patas debía hallar el centro de gravedad de cada dinosaurio. Con ese propósito, suspendí cada modelo de un hilo, primero fijado a la nariz para que colgara verticalmente y luego prendido del dorso para que pendiera horizontalmente. Fotografié todos los modelos en ambas posiciones, y tuve cuidado de asegurar que el eje de la cámara cayera perpendicular al plano del que colgaba la réplica de plástico a escala. (Para semejantes manipulaciones resulta mejor el hilo de nilón que el de algodón trenzado, que se retuerce y arrastra en su giro al modelo.) Puesto que los dinosaurios colgaban con su centro de gravedad situado directamente bajo

Fuerzas ejercidas sobre los huesos

Cuando un animal se desplaza, sobre los extremos de sus huesos se ejercen fuerzas que causan tensiones en la caña. Estas tensiones pueden descomponerse en diferentes fuerzas componentes: la fuerza axial (F_{ax}) y la fuerza transversal (F_{trans}).



En la sección transversal (*superficie A*) del esquema, la tensión resultante es $-F_{ax}/A$ (la fuerza es negativa porque es compresiva). Esta fuerza es más débil que la de F_{trans}: $F_{trans}x/Z$. (Z representa el módulo de sección, expresión ingenieril para describir ciertas propiedades de la sección transversal.)



5. ELEFANTE Y *APATOSAURUS*, un dinosaurio herbívoro; ambos tienen aproximadamente los mismos indicadores de resistencia para los huesos de sus patas. Esta semejanza significa que el gigante extinto corría probablemente a la manera de nuestro mamífero.

el punto de fijación, el hilo apuntaba hacia el centro de gravedad en cada fotografía. Superponiendo dos fotografías podía descubrir el centro de gravedad.

Esta técnica presentaba una ligera complicación que se solucionó fácilmente. A diferencia de los dinosaurios reales, que habrían tenido aire en sus pulmones y huesos densos insertos en masa muscular menos densa, los modelos, de plástico sólido, poseían una densidad uniforme. En los animales los huesos se hallaban distribuidos por todo el cuerpo, con lo que probablemente no afectaban demasiado a la posición del centro de gravedad; pero el aire se concentraba cerca del extremo anterior del tronco. Compensé las disparidades de densidad mediante cálculo (suponiendo pulmones de aproximadamente la misma fracción de volumen corporal que la que se encuentra en los reptiles y mamíferos modernos) y mediante la perforación de un agujero que ocupara el volumen correspondiente a los pulmones.

La corrección forzada por los pulmones desplazó muy poco el centro de masas: menos de 20 centímetros en un saurópodo de 20 metros. Una vez supe, o creí saber, dónde se hallaba el centro de masas del dinosaurio, dividí su peso entre las extremidades anteriores y las posteriores. (Por ejemplo, si el centro de masas se hallaba dos metros por detrás de los pies anteriores y un metro delante de los posteriores, éstos habrían cargado con dos tercios del peso.)

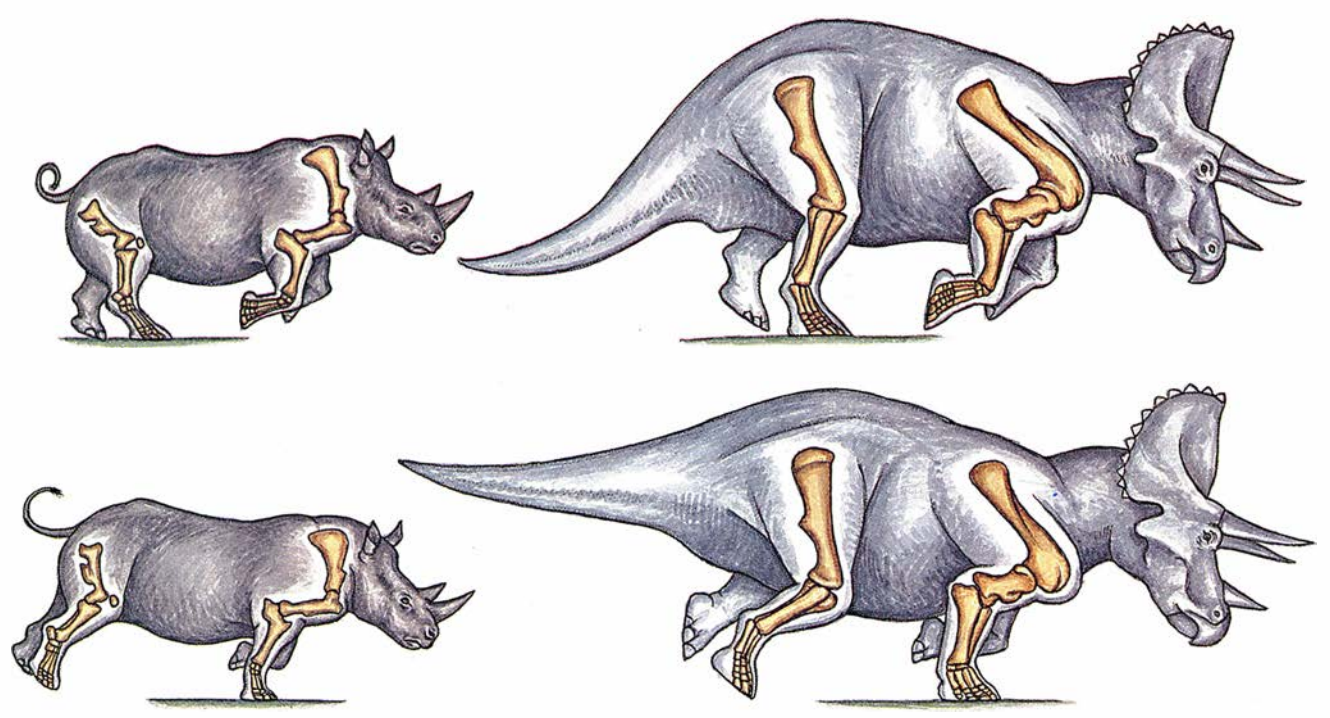
La suma de todos estos procedimientos y datos suministró la información que precisábamos para calcular los indicadores de resistencia *Z/aWX* relativos a distintas extremidades de dinosaurios. Recuérdese que obtener valores mayores a partir de esta fórmula supone más agilidad para el animal.

El cómputo nos permitió comparar elefantes con *Apatosaurus*, un saurópodo imponente conocido vulgarmente por brontosaurio. Los indicadores de resistencia que van de siete a 11 para los distintos huesos de la pata de un elefante africano no son muy distintos de los valores de seis a 14 para *Apatosaurus*, cuyos huesos, aunque mayores, eran de proporciones similares.

Esta comparación sugiere que, a pesar de su enorme tamaño, *Apatosaurus* pudo haber alcanzado casi la agilidad del elefante, capaz, como sabemos, de una carrera lenta e incapaz de galopar o saltar (basta una zanja estrecha para mantenerlos en un recinto del zoológico). Parece probable que lo mismo ocurriera con *Apatosaurus*. No podemos ser más precisos en lo concerniente a velocidades porque la mayoría de las atribuidas a los elefantes procede de relatos subjetivos, y es probable que quienquiera que haya tenido una experiencia alarmante con un proboscídeo exagere. Una película de un elefante joven a la carrera revela una celeridad de unos cinco metros por segundo (lenta para un corredor humano). Para alcanzar el mismo número de Froude en sus patas más largas, *Apatosaurus* debería haber corrido a siete metros por segundo, es decir, con algo más de brío que nuestro proboscídeo.

Diplodocus, un saurópodo más grácil, parece tener un indicador de resistencia menor, al menos para el fémur (el único hueso del que obtuve una sección transversal). No poseía, probablemente, la agilidad del anterior; podía andar en tierra firme, sin limitarse a la flotación en el agua, pero sería incapaz de correr. Abundan las dudas, para nuestro infortunio, sobre la masa de *Diplodocus* y del dinosaurio cornudo *Triceratops*; en ambos casos, las medidas se han hecho sobre un modelo flaco y sobre otro corpulento; no está claro cuál de los dos es más exacto.

Los indicadores de resistencia para *Triceratops*, superiores a los de cualquiera de los dos saurópodos, caen entre los valores correspondientes a elefantes y los de animales más atléticos, como el búfalo africano. Nos sugiere ello que *Triceratops* pudo haber sido más atlético que los elefantes, capaz, quizá, de galopar como el búfalo y los rinocerontes. Tengo una película de un rinoceronte blanco adulto, de unas dos toneladas, galopando en un recinto grande de un zoológico a siete metros por segundo mientras era perseguido por un vehículo. Para que *Triceratops* hubiera alcanzado el mismo número de Frou-



6. *TRICERATOPS* pudo haberse desplazado como el rinoceronte blanco, un herbívoro cornudo moderno. El rinoceronte blanco de la ilustración, que se dibujó a partir de una película, está galopando a siete metros por segundo, la velocidad de una carrera rápida en el hombre.

de (aunque es dudoso que pudiera hacerlo), tendría que haber corrido a nueve metros por segundo.

Las conclusiones que se han obtenido para *Apatosaurus*, *Diplodocus* y *Triceratops* son todavía provisionales. Más cautos incluso hemos de ser con *Tyrannosaurus*: todos los bípedos modernos alcanzan una talla mucho menor. En realidad, no hay ningún bípedo contemporáneo que mueva las patas a la manera de la estructura de aquél. Sólo podemos señalar que el indicador de resistencia de un fémur de *Tyrannosaurus* es bajo, en el rango del elefante.

Los cálculos que me permitieron establecer la agilidad de los dinosaurios se asientan en los principios de la física y la ingeniería. Me sirvió, sobre todo, la noción de similaridad dinámica, cuyos orígenes están en la construcción naval, aunque ha terminado por convertirse en concepto imprescindible en aerodinámica, ingeniería térmica y en otras disciplinas. Recurrí también, para completar mi trabajo, a la teoría de las tensiones en las vigas (el módulo de sección), familiar a cuantos se dedican a la ingeniería de estructuras.

Ese arsenal teórico nos indicó el camino de las resistencias y las velocidades de los dinosaurios. Pero sería absurdo pretender que los cálculos sean exactos. Espero haber explicado claramente algunas de las fuentes de error. Estas estimaciones dan la impresión de que, aunque los grandes dinosaurios andaban lentamente, la mayoría estaban capacitados para lanzarse a una carrera bastante rápida y ninguno necesitaba vivir en el agua para sostenerse.

Por lo que nos dicen esas huellas, si hubiéramos vivido en aquel entonces (y hubiéramos tenido valor para ello), podríamos haber correteado junto a un saurópodo o un tiranosaurio que deambularan, manteniendo la distancia sin dificultad. Los cálculos derivados de las dimensiones de los huesos sugieren que los saurópodos grandes pudieron gozar de la agilidad de los elefantes, con un *Triceratops* algo más atlético.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

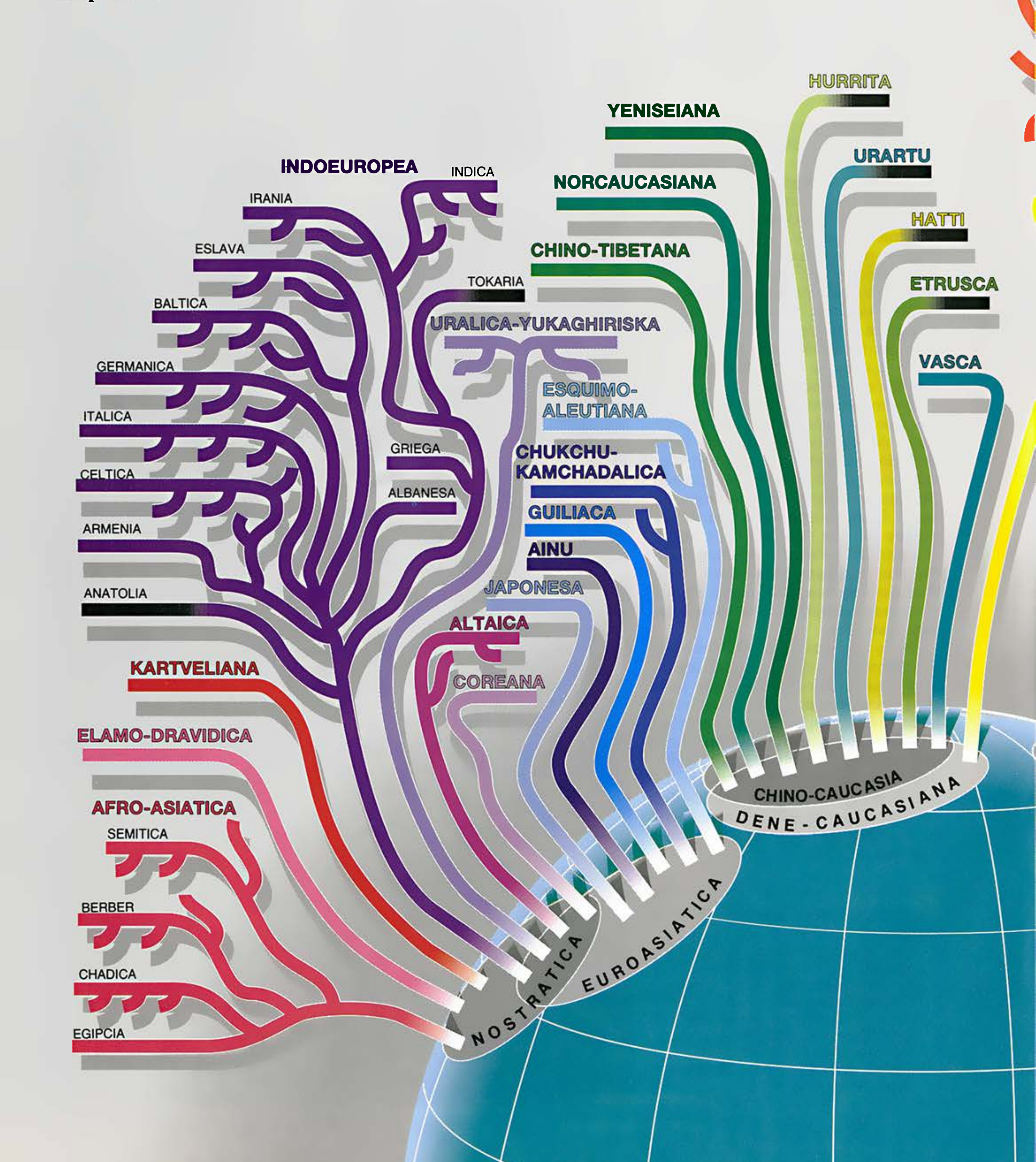
MECHANICS OF POSTURE AND GAIT OF SOME LARGE DINOSAURS. R. McNeill Alexander en *Zoological Journal of the Linnean Society*, vol. 83, n.° 1, págs. 1-25; febrero de 1985.

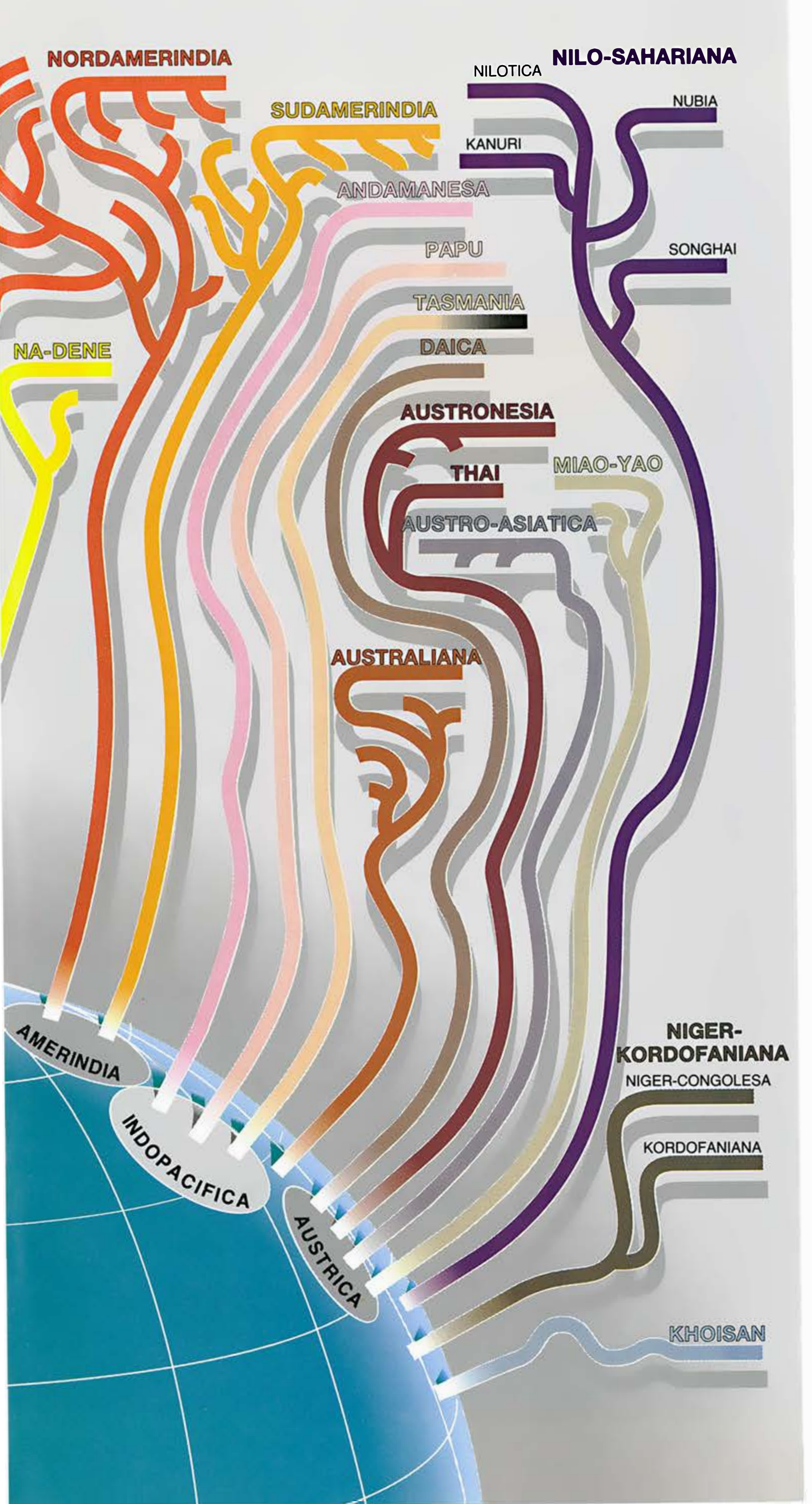
DYNAMICS OF DINOSAURS AND OTHER EXTINCT GIANTS. R. McNeill Alexander. Columbia University Press, 1989.

DINOSAUR TRACKS. Tony Thulborn. Chapman and Hall, 1990.

PALABRAS DIFICILES

Philip E. Ross





¿Cuán hacia atrás puede remontarse uno en el lenguaje? Los lingüistas radicales miran a la edad de Piedra, contra el parecer de los tradicionalistas.

En el principio era la palabra. Pregúntenle a Merrit Ruhlen cuál, y les responderá: *tik*. Con ese simple monosílabo el hombre prehistórico pudo haber denominado al dedo. Ruhlen dice que en inglés se convierte en *toe* y en latín en *digitus*. El se niega a ponerle una fecha a la raíz, aunque otros sostienen, a partir de datos de la genética, que se remonta quizás 100.000 años atrás.

Ruhlen, un lingüista sin filiación, pertenece a un pequeño grupo de investigadores radicales que creen poder escuchar los ecos de las voces antiguas. En su opinión, podemos rastrear las huellas de todas las lenguas del mundo hasta llegar a una sola fuente hablada en un pasado remoto, una lengua no oída desde la doma del primer caballo y la presencia domesti-

EL ESQUEMA GENEALOGICO vincula familias enteras de lenguas con superfamilias cuya existencia se ha postulado. La familia indoeuropea, por ejemplo, aparece en color púrpura; abarca el inglés en su rama germánica (arriba, a la izquierda). *Algunos lingüistas soviéticos agrupan esta familia con otras seis en la controvertida familia nostrática* (abajo, a la izquierda). *También se ha propuesto una superfamilia alternativa, la euroasiática. La mayoría de los lingüistas considera no probada la existencia de todas las superfamilias y de algunas de las familias. Familias como la etrusca y subfamilias como la anatolia, que carecen de lenguas vivas, aparecen en negro.*

cada del perro, conducido a regañadientes hasta el fuego del campamento. Otros se contentan con retrotraer el lenguaje hasta raíces comunes, hace entre 12.000 y 15.000 años, con anterioridad al desarrollo de la agricultura.

Que los varios miles de lenguas habladas por los cinco mil millones de personas del mundo surgieron de una raíz común es, de hecho, una idea convincente. Es el paralelo lingüístico de la "hipótesis de Eva", formulada por Allan C. Wilson, Mark Stoneking y Rebecca L. Cann, de la Universidad de California en Berkeley, que compararon entre sí muestras de ADN para seguirle la pista a la población humana hasta una mujer de Africa, que vivió unos 150.000 años atrás. La hipótesis podría incluso rivalizar en importancia con la gran teoría unificada tras la que andan los físicos. Pero, al igual que sus contrapartidas en otras disciplinas, la monogénesis del lenguaje es difícil de demostrar.

Durante casi dos siglos, los estudiosos han estado agrupando las lenguas en familias, unas 200 en total. Algunas familias, a las que se denomina aisladas, contienen un solo miembro. El vasco, una lengua que se habla todavía en el norte de España y sur de Francia, es el ejemplo mejor conocido. Pero la mayoría contiene cierto número de lenguas cuyas similaridades señalan su procedencia de un antepasado común, la protolengua de la familia. Se cree que las protolenguas más antiguas aceptadas por todos los lingüistas se hablaban hace unos 7000 años.

Para los lingüistas comparativos que han dedicado carreras enteras al duro estudio de un grupo de lenguas, la idea de que cabría comparar las familias mismas y discernir sus más lejanas raíces peca de una ambición rayana en lo imposible. Si se pudiera uno deslizar en el árbol del lenguaje hasta las puntas de las raíces, entonces los troncos en los que han trabajado la mayoría de los especialistas nos parecerían ramas de un árbol más frondoso.

Acallados a gritos

Sin embargo, eso es lo que están haciendo dos grupos de investigadores. El primer esfuerzo serio por descender ramas abajo del lenguaje humano hasta un tronco neolítico de unos 12.000 años de antigüedad lo acometieron, hace treinta años, Vladislav M. Illych-Svitych y Aaron B. Dolgopolsky, dos lingüistas soviéticos. Empezaron trabajando independientemente y acabaron por poner en conexión seis familias de lenguas, hasta alcanzar una hipotética antepasada que denominaron "nostrática", término derivado del latín que significa nuestra (lengua). Estas familias transmiten, en conjunto, la herencia cultural de tres cuartas partes de la humanidad.

En los EE.UU., Joseph H. Greenberg, de la Universidad de Stanford, comenzó a comparar familias de lenguas en los años cincuenta. Su obra más conocida, *Language in the Americas*, se publicó en 1987. Allí clasificó las miríadas de lenguas de las Américas en tres grupos, cada uno con sus propios y remotos antepasados. Así enlazó las tres cuartas partes de las fa-



Familias de lenguas vivas del mundo

El mapa indica las extensiones actuales de las principales familias lingüísticas, la mayoría de las cuales suelen ser aceptadas por los expertos. Pero las hay también controvertidas, en particular la familia amerindia. Allí donde una familia entera ha quedado oscurecida por lenguas indoeuropeas recientemente adoptadas, como el inglés, el francés o el portugués, se indica la familia indígena.

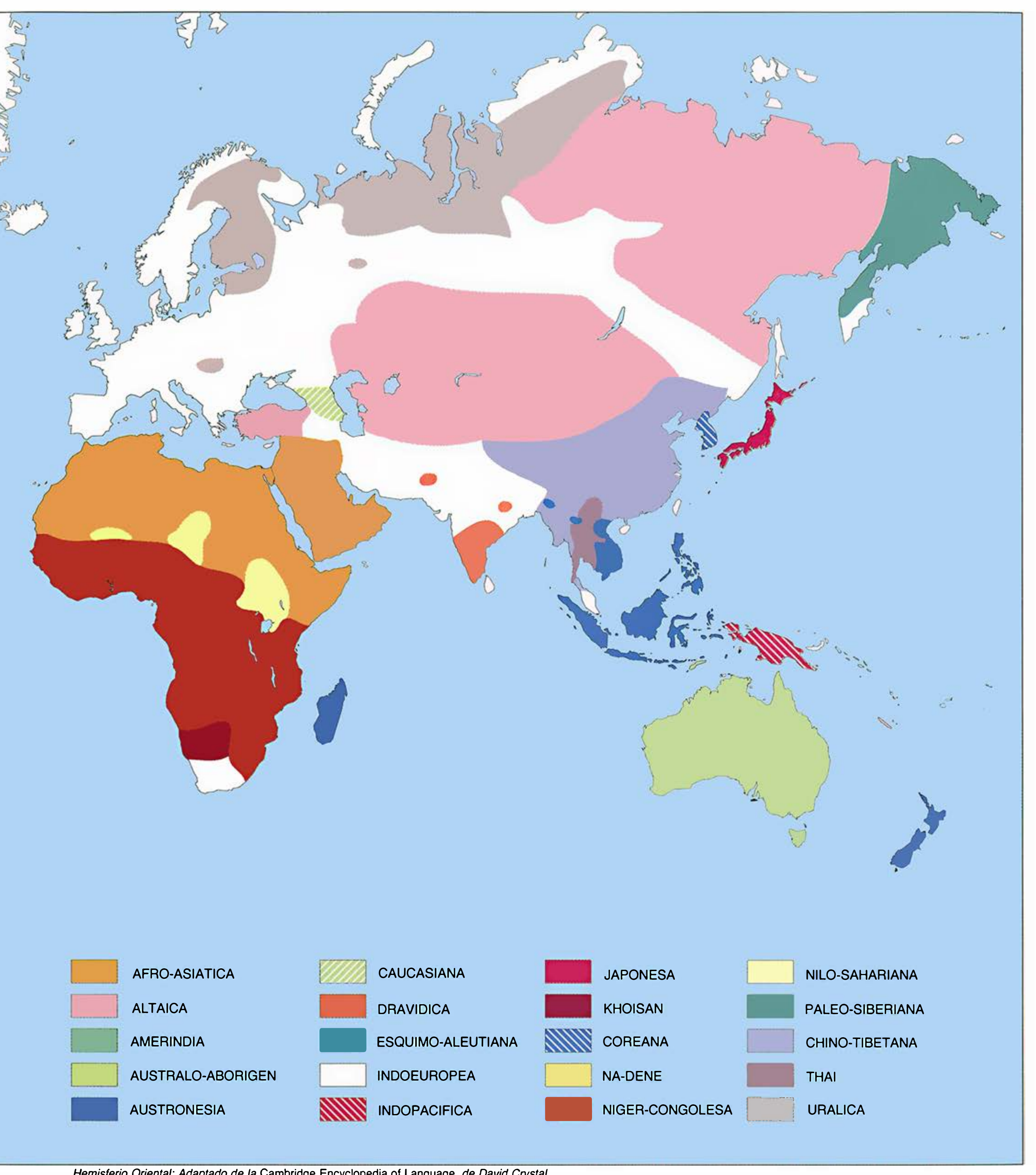
Hemisferio Occidental: Adaptado de Language in the Americas, *de Joseph H. Greenberg.*

milias de lenguas de cuya existencia actual o pasada se tiene noticia.

No había salido siquiera de la imprenta, y comenzaron a lloverle las críticas. En 1986 apareció un extracto del original en *Current Anthropology*. La publicación dio lugar a que Lyle Campbell, que enseña lenguas aborígenes de América en la Universidad de Louisiana, dijera que la clasificación merecía ser "acallada a gritos", para evitar que los antropólogos perdieran su tiempo tratando de confirmarla.

Pero la oposición más implacable contra los nostraticistas, Greenberg y sus asociados, procede de los lingüistas comparativos tradicionales, que laboran en el campo de la familia de lenguas indoeuropeas. Se supone que esta familia desciende de un lengua exclusiva que se habló hasta el cuarto o quinto milenio antes de Cristo.

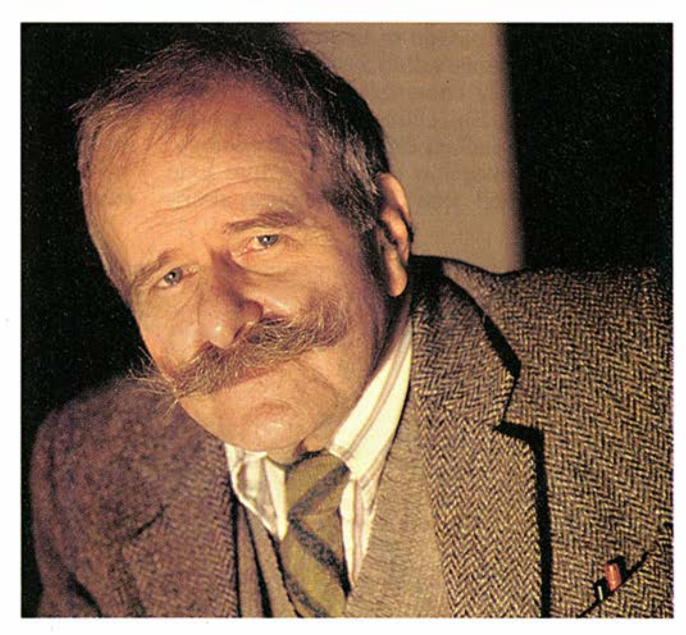
Todos los especialistas están de



Hemisferio Oriental: Adaptado de la Cambridge Encyclopedia of Language, *de David Crystal.*

Duelo de lingüistas

Los investigadores del lenguaje disputan acaloradamente acerca de cuán hacia atrás puede trazar uno la genealogía del lenguaje. Eric P. Hamp (*izquierda*), de la Universidad de Chicago, lidera el enfoque conservador de los investigadores que reconstruyen la historia de las lenguas indoeuropeas, la familia mejor estudiada. No está dispuesto a aceptar ninguna etimología que no dé cuenta de los cambios de sonido y significado que una palabra pudo haber sufrido a lo largo de su historia. Aaron B. Dolgopolsky (*centro*), de la Universidad de Haifa, cofundó el estudio de la hipotética superfamilia nostrática hace 30 años, cuando vivía todavía en la Unión Soviética. Dolgopolsky insiste en que las 1600 raíces nostráticas que él y sus colegas han reconstruido satisfacen las duras exigencias de Hamp, aun cuando las etimologías comiencen allí donde las dejaron los indoeuropeístas. Joseph H. Greenberg (*derecha*), de la Universidad de Stanford, representa la escuela de pensamiento más radical. Agrupa todas las familias lingüísticas —muy recientemente las 150 familias del Nuevo Mundo— en unas cuantas superfamilias sin preocuparse por reconstruir los diversos estadios de su desarrollo. Dice que su método, consistente en comparar a la vez muchas lenguas, le permite discernir pautas de parentesco que escapan a los lingüistas de especialización más estrecha.



acuerdo en que en el amanecer de la historia, hace aproximadamente 4000 años, el proto-indoeuropeo se había fragmentado en una docena de ramas; dos de éstas, la anatolia y la tokaria, no dejaron ningún superviviente. En la Edad Media, la germánica, la itálica, la celta, la báltica, la eslava, la albanesa, la griega, la armenia, la iraní y la índica se habían desglosado en un sinnúmero de lenguas modernas, varias de las cuales han recorrido el mundo desde entonces a hombros de conquistadores, colonos, mercaderes y misioneros, convirtiéndose en hablas nativas de uno de cada dos seres humanos.

El estudio del indoeuropeo arranca de las clasificaciones sistemáticas, llenas de fantasía, de los siglos XVI y XVII, cuando los teólogos, en su explicación del pasaje escriturístico de la confusión de lenguas en Babel, retrotraían todas las lenguas al hebreo bíblico. El inicio de las etimologías secularizadas se remonta también al siglo XVII, con Gottfried Wilhelm Leibniz, el codescubridor del cálculo.

Los lingüistas prefieren, sin embargo, fechar su campo con el primer gran logro, en este caso un argumento esgrimido en 1786 por Sir William Jones, erudito y jurista, quien observó, a propósito del sánscrito, el griego y el latín, que "ningún filólogo podía examinar los tres sin pensar que habían surgido de una fuente común, la cual, quizás, ya no existe".

Sucesores inmediatos de Jones fueron el danés Rasmus Rask y los alemanes Franz Bopp y Jacob Grimm, uno de los hermanos Grimm, afamados escritores de cuentos. Grimm atrajo la atención hacia las sistemáticas diferencias de sonido entre palabras de distintos grupos indoeuropeos que entrañaban significados similares. Cayó en la cuenta de que miembros modernos de la familia germánica como lo son el inglés y el alemán tenían una *f* y una *v* allí donde los otros grupos situaban una *p*. Por ejemplo, inglés y alemán dicen *father* y *vater* donde el latín tiene *pater* y el sánscrito *pitar-*. Posteriormente se halló que un entramado de semejantes cambios fonéticos, así se les llama, ha dejado huellas en muchas otras lenguas.

La técnica comparativa alcanzó una forma casi moderna a mediados del siglo XIX en la obra de August Schleicher, que fue el primero en tabular dendrográficamente las familias de lenguas. Fue el primero, también, en intentar reconstruir las lenguas infiriendo sus palabras de formas tardías, proceso éste laborioso que se ha comparado con el de la triangulación. Imaginó incluso cómo podrían estas palabras haber producido oraciones en combinación con indicadores gramaticales, que, asimismo, él recreó.

Los expertos en lingüística histórica buscan analogías que puedan luego someter a prueba empleando diversos criterios, a fin de determinar si la analogía es una forma que desciende directamente del último antepasado común de las dos lenguas. A tales formas se las califica con el cultismo latino de cognadas (emparentadas). Pero en el lenguaje, en donde el cambio es la regla y en donde las palabras se intercambian, modifican y desechan, la reconstrucción de verdaderos significados es un proceso complejo.

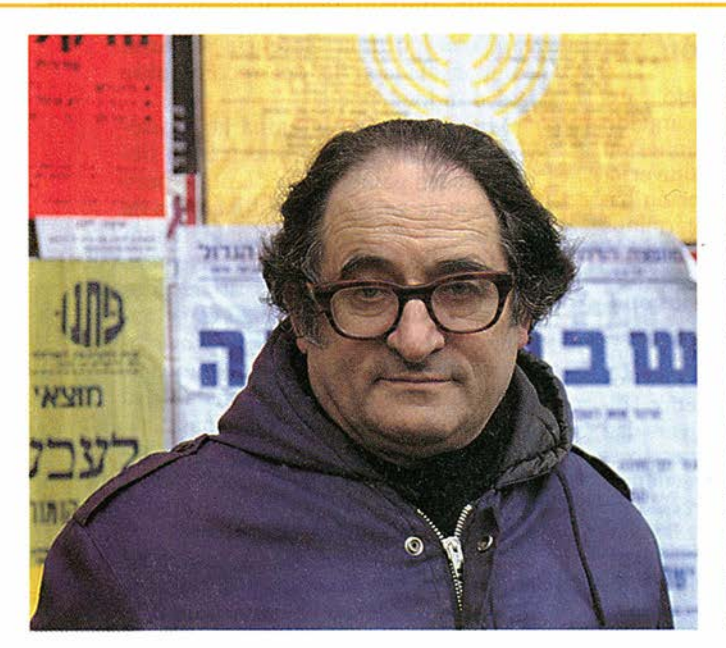
Este método se apoya en la noción de parentesco genético de dos lenguas aun cuando carezcan de formas cognadas comunes. Si la lengua A comparte formas cognadas con la lengua B, que a su vez comparte formas cognadas con la lengua C, las tres poseerán lazos de parentesco. Cabría, sin embargo, imaginar que los léxicos de A y C no se solaparan. El parentesco afecta a la historia de la lengua, no a su contenido.

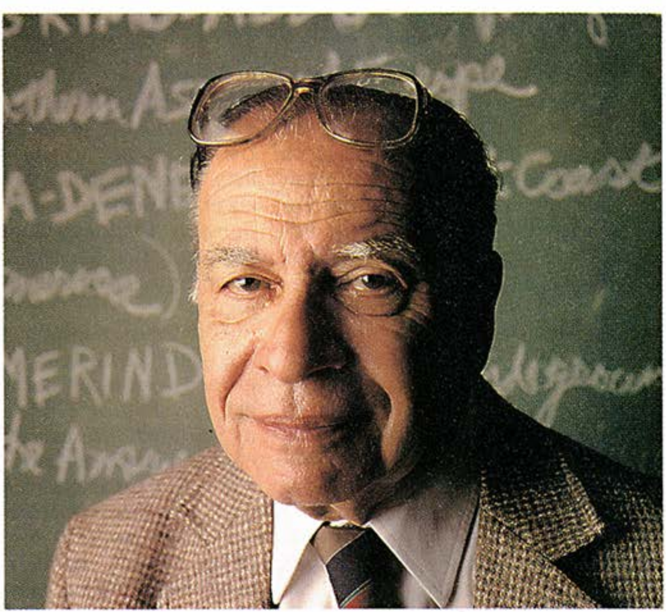
Los lingüistas tradicionales se limitan a comparar, cada vez, unas cuantas lenguas, en su búsqueda de aspectos comunes y reconstrucción de raíces. Hasta el momento, los indoeuropeístas han recuperado un amplio repertorio de palabras habladas mucho antes de que se inventara la escritura. Semejantes reconstrucciones dicen a menudo más sobre culturas antiguas de lo que puede aprenderse a partir de sus artefactos materiales.

Patriarcas prehistóricos

Considérese, por ejemplo, la palabra indoeuropea reconstruida que significa padre: *p'tēr-*. Los lingüistas modelaron esta raíz a partir de formas derivadas, que estudios comparativos han mostrado que significa el varón cabeza de familia, el *pater familias* latino. Por eso sabemos que los hablantes indoeuropeos formaban comunidades patriarcales.

De forma parecida, los lingüistas piensan que la palabra indoeuropea para dios era *deiw-os*, que posteriormente aparece en latín como *deus*.





Combinada con *p'tēr-*, designaba el dios patriarcal de la religión indoeuropea: *Dyeu p'ter-*. Sobrevivió como *Jupiter* en latín, *Zeus patēr* en griego y *Dyaus pitar* en sánscrito.

Mediante estos medios, algunos mitos de las culturas clásicas pueden reconstruirse hasta obtener patrones arquetípicos, reflejos antropomórficos éstos del modo de vida de los indoeuropeos. "Las palabras reconstruidas *deiw-os* y *Dyeu p'ter* nos descubren, ellas solas, mucho mejor el mundo conceptual de los indoeuropeos que una sala llena de ídolos esculpidos", escribió Calvert Watkins, de la Universidad de Harvard, en su introducción a un diccionario de raíces indoeuropeas.

Viene a ser como si el vocabulario proto-indoeuropeo reconstruido condensara volúmenes enteros sobre la vida de quienes lo hablaron. Los lingüistas soviéticos Thomas V. Gamkrelidze y V. V. Ivanov señalan, por ejemplo, que las numerosas palabras de animales domesticados (perros, vacas u ovejas) y cereales (cebada o trigo) muestran el carácter predominantemente agrícola de esas culturas.

Gamkrelidze e Ivanov han reinterpretado también los datos ofrecidos por la lingüística hasta precisar con exactitud el lugar donde surgió el indoeuropeo. Se vio su origen en diversas zonas de la estepa rusa y los bosques de la Europa del Norte; esos investigadores aducen, por contra, que cierto número de palabras denuncian su préstamo de las lenguas no-indoeuropeas de la antigua Mesopotamia, específicamente del este de Anatolia (en la actualidad parte de Turquía) y del sur del Cáucaso (en la Georgia soviética).

Desde ahí la protolengua se extendió y diferenció hasta convertirse en las lenguas que constituyen hoy este grupo. La imagen tradicional invoca conquistadores a caballo que impusieron su lengua por la fuerza. Pero otro escenario, propuesto recientemente por el arqueólogo Colin Renfrew, de la Universidad de Cambridge, presenta una difusión gradual del lenguaje nacida, no del carro del guerrero, sino del arado del agricultor.

Basándose en las pruebas de la arqueología, Renfrew concluyó que la descendencia del agricultor, en su breve expansión del lugar de nacimiento, podría haber propagado las lenguas a lo ancho de Europa en un intervalo de 1500 años. Cuando los pueblos perdían el contacto entre sí, su habla cambiaba, de generación en generación, convirtiéndose primero en dialectos distintos y luego en lenguas ininteligibles entre sí. Aunque pareciera que semejante mecanismo agrícola podría haber guiado la dispersión y diferenciación de lenguas habladas con anterioridad a la invención de la agricultura, Renfrew afirma que se siente intrigado por la hipótesis nostrática. "Cuanto más he oído de la lengua nostrática, más me ha interesado", asegura.

Los lingüistas tradicionales creen que sus reconstrucciones se apoyan en argumentos sólidos. Las reconstrucciones, dicen, satisfacen las definiciones más estrictas de la ciencia: hacen predicciones que pueden ser contrastadas positivamente con los datos de la observación empírica. Un caso famoso data del siglo XIX, cuando Ferdinand de Saussure, lingüista francés, dedujo que las lenguas indoeuropeas descendían de un sistema que incluía una clase de sonidos que no habían sobrevivido en ninguna habla conocida. Estudiosos posteriores identificaron los sonidos con las consonantes laringales, llamadas así porque se producen en el fondo de la garganta.

La teoría de Saussure fue considerada un constructo bien elaborado, aunque bastante artificial, hasta los años veinte, cuando los arqueólogos desenterraron tabletas procedentes de los archivos de los reyes hititas de Hattussa, en la actual Turquía. Las tabletas estaban escritas en las lenguas anatolias, hasta entonces desconocidas, que conservan algunas de las consonantes proto-indoeuropeas originales que Saussure había predicho.

Los nostraticistas arguyen que sus comparaciones promueven descubrimientos igualmente válidos sobre culturas mucho más antiguas. El nostrático, se dice, es un antepasado del indoeuropeo, de las lenguas dravídicas de la India, de las lenguas kartvelianas del sur del Cáucaso, de la familia urálica (incluyendo el finés y el samoyedo), la altaica (como el turco y el mongol) y la afroasiática o, como a veces se la llama, la camito-semítica (como el árabe y el bereber).

Illych-Svitych murió a la edad de 31 años en un accidente de tráfico, dejando incompleto su diccionario de raíces nostráticas. Dolgopolsky, que emigró a Israel en la década de los setenta, prosiguió la obra en la Universidad de Haifa. Ha recopilado ya unas

Una disciplina donde predomina la precaución

Escaldados con lo ocurrido antes de la segunda guerra mundial, y durante la misma, muchos expertos en lingüística histórica se apresuran hoy a desautorizar cualquier intento de hallar relaciones entre genes y lenguas. Hasta los lingüistas que se especializan en otras ramas de ese tronco tienden a recelar de toda idea que apunte implicaciones racistas.

Sea la teoría de las lenguas criollas propuesta hará unos 10 años por Derek Bickerton, de la Universidad de Hawai. Bickerton estudió las lenguas comunes creadas por los inmigrantes que se habían introducido en las comunidades isleñas; descubrió que habían cambiado de una forma chocante entre la primera y la segunda generación de hablantes. Los hablantes de la primera generación pegaban entre sí engorrosos códigos llamados *pidgins*, mientras que sus hijos creaban lenguas completas, llamadas criollas. Bickerton arguyó que las lenguas criollas comparten rasgos estructurales que reflejan pautas mentales innatas.

No es ésta la idea igualitaria que podría parecer a simple vista, dice Mark R. Hale, de la Universidad de Harvard. "Que los criollos preservan una estructura innata en los niños de menos de dos años es, en algún sentido, una idea racista o que puede ser utilizada para eso", dice. ¿No podría la sintaxis invariante de las lenguas criollas servir mejor para demostrar la unidad de la humanidad? Creo que ésa era la intención de Bickerton, replica Hale, tras una pausa. "Pero existe el peligro de que otros le den otra interpretación. Recuérdese, estas lenguas criollas son habladas por gente cobriza, por hijos de esclavos y de trabajadores indocumentados."

Incluso estudiando las palabras para los colores puede un lingüista meterse en berenjenales políticos. En 1968, Paul Kay y Brent Berlin, de la Universidad de California en Berkeley, se aprestaron a comprobar si la gente percibía el mundo, siempre, a través de la malla conceptual del lenguaje. La posición extrema sostenía que un ruso, por ejemplo, podría verse condicionado por su lengua a ver un color como azul claro o azul oscuro, mientras que un americano podría verlo como el simple azul familiar, para el que existe una sencilla palabra en inglés.

Kay y Berlin descubrieron que no se procedía así. "Las lenguas que agrupan muchos colores bajo un solo término tienden a hacerlo de la misma forma", observa Kay. "Algunos no me lo han perdonado", explica. "Hay quien incluso ha argüido que mi teoría tenía implicaciones racistas —no por su aspecto universalista, sino por llamar la atención hacia el cambiante número de términos de color. Las lenguas de los opresores coloniales tienden a poseer más palabras de color que las de los oprimidos."

Aflicciones también para un biólogo que vincula las lenguas a los grupos de población. El genético Luigi L. Cavalli-Sforza, de la Universidad de Stanford, fue atacado por establecer correlaciones entre la frecuencia con que ciertos genes aparecían en determinadas poblaciones y las lenguas que esas poblaciones hablaban. En su opinión, genes y lenguas divergieron al mismo tiempo —cuando las poblaciones se separaron unas de otras- - y algunas escisiones datan de la colonización de la tierra por el moderno *Homo sapiens*.

Fue Charles Darwin el primero en ligar la evolución de las lenguas a la biología. En *La ascendencia del hombre* (1871) escribió: "Curiosamente, la formación de las diferentes lenguas y las distintas especies y las pruebas de que ambos han evolucionado por medio de un proceso gradual son paralelas." Pero a los lingüistas les acobarda la idea de que la evolución pueda transformar lenguas simples en complejas.

Hoy se cree que, en un sentido básico, ninguna lengua es "prioritaria" sobre cualquier otra, viva o muerta. Las lenguas cambian incluso mientras las hablamos, pero ninguna mejora o degenera. El inglés moderno puede ser mejor que el inglés antiguo para discutir de física, pero esto nada dice sobre los recursos potenciales de una u otra lengua.

Los lingüistas de antaño no conocían tales reservas a la hora de evaluar las lenguas. En el siglo pasado, August Schleicher las clasificaba por sus estructuras.

Schleicher decía que las lenguas "aislantes", como el chino, usaban elementos simples; eran, por ello, más "primitivas" que las lenguas "aglutinantes", como el turco, que construye sus palabras a partir de distintas formas. Situaba en una posición superior las lenguas "flexivas", como el alemán, porque las palabras varían con su función. Ponía el sánscrito en el lugar más alto por lo elaborado de sus inflexiones. Sin embargo, el sistema fallaba en sus propios términos por situar las lenguas de muchos cazadores-recolectores por encima de las que hablaban los propios lingüistas.

1600 raíces, muchas de las cuales llevan consigo una herencia cultural comparable con la del reconstruido léxico indoeuropeo.

Mayor interés, sin embargo, encierran las diferencias: el nostrático tiene muchas palabras de plantas, pero ninguna de variedades cultivadas o de tecnología del cultivo. Análogamente, tiene palabras de animales, pero no distingue los animales domésticos de los salvajes. A partir de estas ausencias de datos concluyen provisionalmente los eruditos que la lengua se hablaba antes de la emergencia de la agricultura y de la cría de ganado.

Parecería, por tanto, que los hablantes del nostrático eran cazadores-recolectores. Vitaly Shevoroshkin, antiguo colaborador de los nostraticistas soviéticos que ahora enseña en la Universidad de Michigan, observa que el vocabulario incluye palabras como *haya*, que significaba la terminación de una partida que duraba cierto número de días. Sin embargo, apunta que la existencia de palabras que designan refugios permanentes prueba que los nostratos (así los llama) vivían en aldeas, de las cuales hay indicios arqueológicos provisionales.

No obstante, se les acusa a los nostraticistas de llegar a estas conclusiones por atajos que los lingüistas tradicionales consideran inaceptables. Admiten éstos que los lingüistas soviéticos reconstruyen el entramado de cambios fonéticos requerido y se esfuerzan en recuperar proto-palabras según reglas aceptadas. Pero, mantienen, los nostraticistas comparan datos de cambios dudosos y consideran cognadas palabras de diferentes lenguas que podrían deber su parecido al azar o al simple préstamo lingüístico.

Los nostraticistas replican que salvan el primer escollo al buscar correspondencias complejas de sonidos y rechazan el préstamo porque se fijan en palabras de muy improbable objeto de préstamo. Estas palabras, llamadas estables, denotan conceptos que se les supone comunes a todas las lenguas —por ejemplo, partes del cuerpo u objetos naturales, como el Sol y la Luna—.

Perdida en la estática

"Es cierto que la palabra empleada para designar la casa es mucho menos estable que la usada para mano, porque puede sustituirse, por entero, el sistema de arquitectura y de construcción de casas, y las palabras con él", dice Sergei Starostin, lingüista soviético. "Se sabe que uno toma prestadas cosas y las palabras que las des-

criben. Pero no se puede tomar prestado *mano*; eso no pasa."

Pero no les parece suficiente a los indoeuropeístas. "No afirmo que los nostraticistas estén equivocados. Digo que no han mostrado que estén en lo cierto", declara Eric P. Hamp, de la Universidad de Chicago, jefe de fila entre los expertos en lingüística histórica. Cree, con otros lingüistas conservadores, que, al igual que sucede con la señal transmitida por una estación de radio remota, la información dejada, largo tiempo ha, por lenguas muertas tiende a perderse en la estática del cambio lingüístico aleatorio.

A lo que replican los radicales: Hamp y sus colegas de parecida orientación disparan a ciegas contra la teoría del nostrático y otras afines, sin ofrecer una propuesta razonada. "Repetidamente he pedido a Hamp y a Calvert Watkins, de Harvard, que publiquen sus objeciones al nostrático", dice Alexis Manaster Ramer, de la Universidad estatal de Wayne. "Los dos asistieron a una conferencia sobre estos temas, en 1984, en Ann Arbor; una y otra vez les insté a que dijeran concretamente a qué diablos estaban poniendo objeciones, y no lo hicieron."

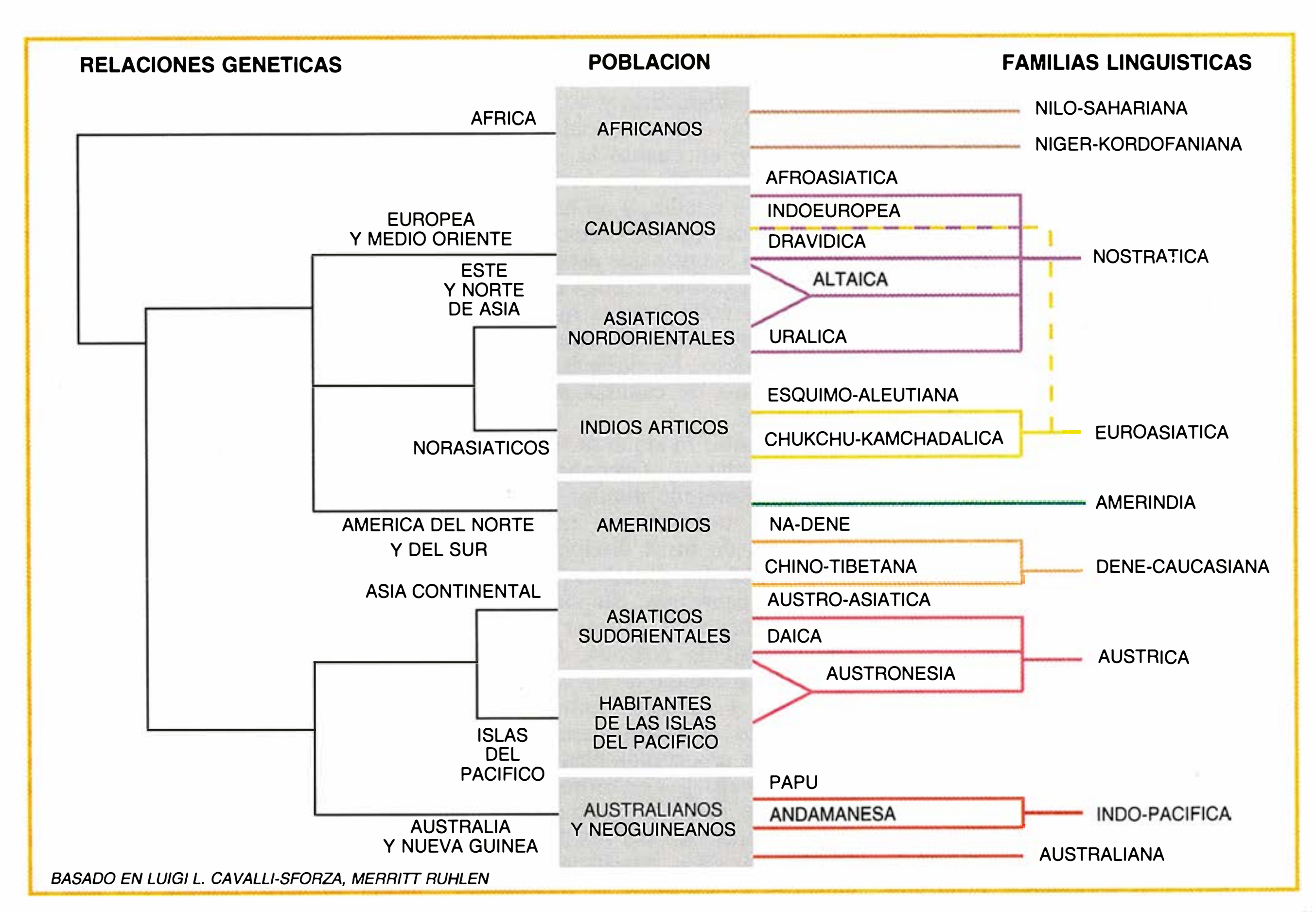
Hamp no se muestra reticente, sin embargo, cuando oye hablar de la raíz nostrática de perro o lobo, a saber, *küjna/qüjna*. "Esa alternancia entre *k* y *q* es ya inaceptable", sentencia. "Hacemos eso en una forma ocasional, y sólo cuando conocemos el sistema fonológico." Cuando oye el significado propuesto para la raíz, *perro*, *lobo*, se desentiende del caso. "Diría que están jugando rápida e imprecisamente con el contenido semántico", dice. "De todo lo que sabemos del proto-indoeuropeo, la palabra para perro se usaba para el animal domesticado, el cual, dejando a un lado la clasificación zoológica, tenía un contenido social. Quien prosigue 'Bien, pasemos de *perro* a *lobo*', tiene una visión del mundo rematadamente ingenua."

¿Qué hay de la lengua nostrática en el mundo neolítico? "Si el nostrático llegó a hablarse cuando el perro se estaba domesticando, entonces sería perfectamente razonable combinar los dos conceptos", arguye Alexis Manaster Ramer. Aaron Dolgopolsky añade: "No creo que Hamp esté en lo cierto en cuanto a que no seamos precisos."

Si los nostraticistas fuerzan las reglas del juego, Greenberg y su grupo se las saltan: ni siquiera se preocupan de reconstruir las raíces. Antes bien, Greenberg maneja, de forma simultánea, grandes grupos de lenguas, un proceso que él denomina de comparación multilateral. Compárese, dice, las 25 lenguas mayores de la Europa moderna en razón de los sonidos que emplean para designar nueve conceptos básicos: uno, dos, tres, cabeza, ojo, oreja, nariz, boca y diente.

En lo que respecta a *uno*, se ve que la mayoría de las palabras pertenecen a cualquier clase. Llama la atención el parecido entre el lituano *vienas* y el letón *viens*. En lo que hace a *dos*, algunas de las fronteras más neblinosas comienzan a aclararse —tal como sucede con *dau*, *dau* y *do*, del bretón, el gaélico y el galés, respectivamente. "Si se prosigue, se acaba con tres grupos principales: indoeuropeo, finougrio y vasco", dice Greenberg. "Después puede dividirse el indoeuropeo en el románico, el báltico, el eslavo, el germánico y el albanés."

Greenberg sostiene que su compa-



1. LAS HISTORIAS GENETICA Y LINGUISTICA se corresponden en líneas generales porque ambas divergen cuando las poblaciones se escinden formando comunidades aisladas. La proximidad genética de las poblaciones se manifiesta en su distancia desde un punto de ramificación común (*izquierda*); su proximidad lingüística se refleja en un diagrama similar de familias y superfamilias lingüísticas (*derecha*).

¿Han nacido los seres humanos para hablar?

Si se trata de una invención, el lenguaje es la mayor de cuantas el hombre ha ideado. Noam Chomsky, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, piensa que no constituye ningún hallazgo. Se han avanzado muchas hipótesis sobre el origen del lenguaje:

- La teoría del guau-guau ("bow-wow"); en virtud de ella, las primeras palabras se formarían por onomatopeya, como en el *guau-guau* del perro, el *cucú* del cuco y el *ziszás* del tortazo.
- La teoría del ¡oh-oh! Las primeras palabras se constituirían de interjecciones que denunciaran emociones: *oh, bah, eh.*
- La teoría del yo-he-ho: Cuando muchas personas coordinan sus esfuerzos para tirar de una cuerda o hacer rodar una piedra, pueden haber tenido que recurrir a cánticos ritualizados que eventualmente adquirieron un significado.
- La teoría del la-la: Algunos sonidos pueden haberse originado en el juego, como el canto de los niños o los arrullos de los amantes.
- Gestos orales: Los primeros hablantes pudieron haber usado los labios para señalar, produciendo cambios vocálicos que distinguieran lo próximo de lo lejano. Esto puede explicar los cambios que en inglés se aprecia en las palabras *this* (esto) y *that* (eso) y en francés en las palabras *voici* (aquí está) y *voilà* (ahí está).

Esto, naturalmente, constituye una petición de principio sobre el origen del lenguaje. Bickerton juega con la idea de que el desarrollo del cerebro produjera el lenguaje como un subproducto suyo. Las estructuras nerviosas que permitieron a los primeros homínidos abstraer de sus percepciones una "representación secundaria" del mundo mejoraron su capacidad para adaptarse a su entorno. Estas estructuras podrían haberles capacitado para conferir significado a gestos y sonidos, produciendo un lenguaje primitivo que no tuviera sintaxis, la ordenación de palabras que define el lenguaje humano.

El lenguaje primitivo podría haber abundado en palabras con significado y carecido de elementos gramaticales. Puesto que habría evolucionado mucho antes que su sintaxis, las huellas de ello podrían rastrearse en los gestos de monos a los que se les ha enseñado los elementos de un sistema de signos. Bickerton sugiere que los niños salvajes también proporcionan indicios de cómo fue el lenguaje primitivo, puesto que han estado aislados en los años cruciales en los que la sintaxis se desarrolla normalmente. Los supuestos "niños-lobo"rescatados de regiones salvajes de la India a principios de siglo pudieron aprender muchas cosas, pero apenas si fueron más allá de la capacidad lingüística de un niño normal de dos años.

El salto del lenguaje primitivo al lenguaje sintáctico es el más difícil de explicar de todos. Bickerton ofrece un argumento provisional cuya conclusión es que "un simple episodio genético podría haber bastado para convertir un protolenguaje en uno sintáctico". Todos los prerrequisitos del lenguaje —mayor cerebro, tracto vocal mejorado, nuevas conexiones nerviosas— suponen cambios en la anatomía de la cabeza.

También Chomsky está de acuerdo en que, en términos evolutivos, el evento debe haber acontecido drásticamente porque la sintaxis refleja un patrón innato de gran complejidad. Piensa que esta capacidad innata explica por qué un niño puede aprender una lengua sin cometer los errores gramaticales que

ración multilateral es tan poderosa que descubrirá relaciones entre lenguas, aun cuando los datos disponibles sean bastante escasos. Hace casi 30 años, comenzó a aplicar el método para una reclasificación de las lenguas africanas, en su mayoría con pobrísima documentación. Su trabajo le granjeó alabanzas, incluso de algunos de sus más feroces críticos. Exito que le animó, a buen seguro, a entrar en la mayor boca de lobo de su vida, las lenguas, muy dispares, del Nuevo Mundo.

Cuando clasificó las lenguas americanas, las dividió primero en las esquimo-aleutianas y las na-dene; éstas con miembros en el Pacífico noroccidental y en el suroeste de los EE.UU., el navajo, por ejemplo. Comúnmente se aceptan ambos grupos. Pero no el tercer grupo de Greenberg, que él llamo amerindio, que abarcaría las numerosas familias lingüísticas del otro hemisferio.

La lengua nostrática irrita a los lingüistas tradicionalistas, pero la tesis amerindia de Greenberg no los aplaca. La razón estriba en la aparente facilidad con que su sistema resuelve uno de los problemas más enrevesados de la antropología contemporánea. Hay unas 150 familias lingüísticas americanas aborígenes: cada una diverge tanto de las demás como el indoeuropeo del chino-tibetano. Ahora bien, el Viejo Mundo posee sólo unas 40 familias, a pesar de una historia de asentamientos mucho más dilatada, que debería haber producido mayor diversidad lingüística, y no menor.

Más. Hay datos cruciales que se desvanecen en cuanto la muerte de sus hablantes pone fin a la última lengua de una familia, y no hay bastantes lingüistas (ni subvenciones) para retener las lenguas que están muriendo. Los lingüistas estiman que la mitad de las 6000 lenguas que existen en el mundo habrán muerto en el siglo venidero. Ni siquiera se puede estar seguro de cuántas podría haber habido.

Sin intentar ni siquiera reconstruir lenguas antiguas, Greenberg insiste en que su método ilumina el pasado lejano. Y un creciente número de científicos de otras disciplinas están de acuerdo. Se contaban, entre los primeros conversos, Stephen L. Zegura y Christy G. Turner II, de la Universidad de Arizona. Se habían dedicado al estudio de las variaciones genéticas y dentales entre nativos americanos. Cuando escucharon a Greenberg una conferencia sobre sus primeros hallazgos en torno a lenguas americanas nativas, le comentaron la concordancia con los resultados obtenidos por ellos. Clasificaciones lingüísticas y biológicas se superpusieron en un mismo mapa: coincidían en líneas generales. Las principales discrepancias surgían en las poblaciones americanas nativas del Pacífico noroccidental, de un historia a todas luces endiablada.

Los primeros americanos

Greenberg y sus dos colaboradores publicaron conjuntamente sus hallazgos en 1986. Llegaban a la conclusión de que los antepasados de los aborígenes americanos debían haber emigrado en tres distintas oleadas por el puente de tierra que antaño unió a Siberia con Alaska. No pudieron descartar más oleadas porque podría no haber quedado huella alguna de otros genes y de otras lenguas implantadas. Es difícil decir exactamente qué comunidades de Asia contribuyeron a estas oleadas, aunque lingüistas soviéticos, trabajando por su parte, han sugerido un vínculo entre las lenguas na-dene y las lenguas del Cáucaso septentrional.

Douglas C. Wallace, de la Universidad Emory, aportó luego nuevas pruebas genéticas en apoyo de la hipótesis amerindia de Greenberg. "Nuestros datos muestran que los paleo-indios, los amerindios, forman un solo grupo", asevera.

La combinación de análisis genético y lingüístico cuadra para América, añade Wallace, porque era una pizarra en blanco. "Los primeros emigrantes que pasaron el puente de tierra no encontraron otra cultura",

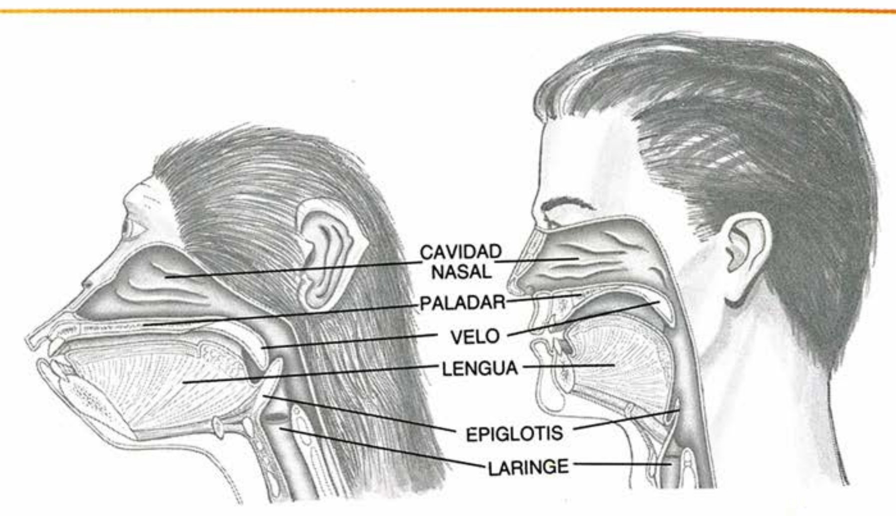
cabría esperar, si no tuviera a mano una estructura preprogramada.

La capacidad del lenguaje humano podría haber emergido repentinamente cuando un evento genético soldara un abanico de caracteres que hubieran evolucionado con un fin distinto, dicen Chomsky y otros. Un carácter tal puede haber sido el control consciente de las vocalizaciones: los chimpacés tratan al menos de reprimir llamadas imprudentes, aunque con poco éxito. Los seres humanos, sin embargo, podemos mentir a través de los dientes.

Otra adaptación pudo traer la capacidad de decodificar vocalizaciones. Ni los mejores telegrafistas logran empaparse del código Morse a la velocidad a la que un niño puede extraer significado de un diálogo. Nuestros cerebros, parece, se adaptan a un proceso de modulaciones vocales.

Las propias modulaciones poseen una riqueza considerable, que brota en parte de la forma insólita del tracto vocal humano. Philip Lieberman, de la Universidad de Brown, hace notar que la forma de éste convierte a los seres humanos en los únicos mamíferos incapaces de beber y respirar al mismo tiempo. El inconveniente es que más de uno se ha ahogado al comer.

Según parece, ese riesgo mayor de ahogo viene compensado por la mayor capacidad de articulación posibilitada por nuestra tracto vocal. Por contra, el hombre de Neanderthal poseía un tracto vocal similar al de un mono, según la reconstrucción hecha por Lieberman con el registro fósil. Si es así, habría tenido uno bastante poco articulado, defecto que podría explicar por qué ese homínido desapareció mientras el *Homo sapiens* sobrevivía.



2. LOS PRIMATES NO HUMANOS, el chimpancé (*izquierda*), por ejemplo, respiran mientras comen gracias al sello estanco que forman la epiglotis y el velo. En los humanos (*derecha*) esa proeza resulta imposible por la posición que ocupa la laringe. Fuente: Philip Lierberman.

dice. "No me sorprende que haya ambigüedades en el Viejo Mundo, porque ha habido muchas mezclas."

Pero esas mezclas pueden explicarse, razona otro importante partidario de la hipótesis de Greenberg, el genético Luigi L. Cavalli-Sforza, de la Universidad de Stanford. "Los genes no ejercen influencia directa en el lenguaje", indica, "pero la lengua que uno aprende depende de dónde se nació y de quién se nació —la familia y el propio medio social. Si un grupo se escinde, el acervo génico y la lengua divergerán, de modo que la historia de los genes y la del lenguaje convergen esencialmente."

Cavalli-Sforza es un avezado investigador en su campo, de igual forma que Greenberg lo es del suyo, y también ha sufrido ataques por apoyar la hipótesis amerindia. Hace tres años, llegó incluso más lejos cuando publicó un estudio en el que hallaba correlaciones entre la frecuencia con que ciertos genes aparecen en poblaciones y las familias lingüísticas habladas en esas poblaciones. Tomó los datos de la clasificación de todas las lenguas del mundo realizada por Greenberg.

Ha habido otros casos notables donde los datos lingüísticos no encajaban con los genéticos, recuerda Cavalli-Sforza. Sin embargo, cada uno de ellos puede considerarse resultado de la sustitución de una lengua por otra o del intercambio de genes. Hungría proporciona un buen ejemplo de intercambio de genes: aunque su población es genéticamente parecida a sus vecinos europeos, habla una lengua de una familia no-indoeuropea, adoptada en la Edad Media de los conquistadores magiares de Hungría. Los americanos de origen africano han sufrido ambos procesos: sustitución de lengua y sustitución parcial de genes. No todo el mundo acepta estas explicaciones. "Los lingüistas pueden examinar parecidos entre palabras para ver si resultan de una evolución común o de un préstamo, pero no veo cómo puede Cavalli-Sforza hacer lo mismo con sus pautas genéticas", objeta Manaster Ramer.

Mas, para obtener una imagen cabal de las antiguas pautas demográficas, Cavalli-Sforza ha puesto un énfasis especial en el estudio de las poblaciones que menos, según se presume, han tomado prestado en su lengua y en sus genes. "En poblaciones aborígenes, no existe una difuminación total", explica. "Las huellas de la historia común permanecen, remontándose, en lo que se me alcanza, hasta la colonización original de la tierra, hará quizá 100.000 años."

Eva mitocondrial

Esa estimación refleja el trabajo sobre una primera mujer, Eva, de Allan Wilson y sus colegas. Los genes que estudiaron para remontarse en la historia de la herencia genética común de la humanidad se hallaban codificados en el ADN de las mitocondrias, orgánulos intracelulares que transforman la glucosa en una forma de energía más fácilmente utilizable. Puesto que el ADN encerrado en las mitocondrias se hereda exclusivamente de la madre, sin mezclarse con los genes del padre durante la mitosis, "la Eva mitocondrial" tenía que ser una mujer.

Wilson y su equipo hallaron más diversidad genética en Africa que en ninguna otra parte; así llegaron a la hipótesis de que Eva y su tribu vivieron en dicho continente. Estimaron las fechas a partir de dos comparaciones: la primera, entre humanos de todas partes; la segunda, entre el grupo humano como tal y los chimpancés. El ADN pasó a emplearse de "reloj molecular", calibrado a partir de la divergencia entre el linaje humano y el del chimpancé, separación que ocurrió hace más de cinco millones de años.

Pero ni la avalancha de pruebas obtenidas por genéticos y arqueólogos basta para persuadir a indianistas como Lyle Campbell, quien rechaza con vehemencia la posición de Greenberg; además de ir mal encaminada, carece, dice, de fundamento. "No concedo a Greenberg ningún crédito", añade. La idea "estaba en el

aire; veníamos trabajando sobre ella. Lo suyo no responde al problema de si tal o cual parecido verbal se debe a razones históricas o a otros motivos".

Campbell también considera desprovistos de valor el elenco de palabras recogido por Greenberg e ilusorios sus patrones gramaticales. Estos patrones, "concluyentes" para Greenberg, son del todo claros en el caso de dos indicadores pronominales, *n*-, que denota la primera persona, y *m*-, que denota la segunda persona. Campbell dice que estos indicadores están ausentes en muchas de las lenguas que Greenberg clasifica como amerindias y presentes en muchas otras que él excluye. Puesto que se trata de nasales fáciles de pronunciar, añade, es probable que los sonidos acaben siendo indicadores gramaticales. Así mismo, invoca el argumento del "habla de la guardería" para vincular cada sonido al concepto que denota.

Al margen de si Greenberg y los nostraticistas están jugando con las reglas, muchos lingüistas consideran plausible la hipótesis de la monogénesis del lenguaje. La misma aparición del lenguaje podría definir al moderno *Homo sapiens* y explicar por qué nuestra especie no se cruzó, por lo que se ve, con contemporáneos suyos como el hombre de Neanderthal. El marco adquiere tintes sobrecogedores: los homínidos sin lenguaje habrían parecido subhumanos.

No es fácil que el tema de la monogénesis se diluya como un azucarillo. La cuestión del origen del lenguaje reviste importancia capital: la historia del lenguaje incide en la del intercambio de bienes, la migración de los pueblos y la evolución de las ideas. Cada descubrimiento —por los expertos en lingüística comparada de cualquier escuela— empuja hacia atrás las fronteras del pasado que se juzga irrecuperable.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TYPOLOGY, RELATIONSHIP AND TIME. Dirigido y traducido por Vitalij V. Shevoroshkin y T. L. Markey. Karoma Publishers, 1986.

LANGUAGE IN THE AMERICAS. Joseph H. Greenberg. Stanford University Press, 1987.

IN SEARCH OF THE INDO-EUROPEANS: LANGUAGE, ARCHAEOLOGY AND MYTH. J. P. Mallory. Thames and Hudson, 1989.

LANGUAGE AND SPECIES. Derek Bickerton. University of Chicago Press, 1990.

UNIQUELY HUMAN: THE EVOLUTION OF SPEECH, THOUGHT AND SELFLESS BEHAVIOR. Philip Lieberman. Harvard University Press, 1991.

Juegos matemáticos

De por qué pueden Tarzán y Jane marchar al paso de los animales que rondan por la jungla

Ian Stewart

Tarzán saltó hacia arriba, proyectó a la vez ambas piernas hacia adelante y cayó al suelo dándose una monumental culada. Jane, desde su arborícola choza, observó perpleja cómo repetía veinte veces la maniobra. Empezó a dudar de que la caja craneana de su musculoso compañero albergara algo de seso. Había dedicado meses a tratar de enseñarle a hablar y a mostrarle los más elementales rudimentos de la ciencia, pero Tarzán se mostraba impermeable a toda idea contraria a las leyes de la jungla. Asiéndose a una liana vecina, Jane se descolgó y bajó a ver por qué su hombre estaba haciendo el mono.

"Buenos días, radiante ángel mío", le saludó alegre el hombre-mono.

Jane comprobó, complacida, que el vocabulario de Tarzán iba mejorando. "¿Tienes motivo especial para dar esos saltos o pretendes nada más darte masaje en las nalgas?"

"Estaba tratando de verificar el principio de Curie."

Una nueva excusa para hacer tonterías, pensó Jane.

"Y me parece que no funciona", concluyó Tarzán.

Jane le tomó de la mano. "Ven; vayamos a algún sitio fresco y tranquilo, donde puedas contármelo todo."

Sentados en el extremo del claro, bajo un árbol umbroso, Tarzán comenzó a explicárselo. "He leído hace poco que el cuerpo humano presenta simetría bilateral o simetría respecto a un plano, lo que significa que ofrece prácticamente el mismo aspecto cuando se le ve reflejado en la superficie de un estanque tranquilo o en algún otro espejo. ¿Estoy en lo cierto?"

Jane asintió con la cabeza.

"Entonces me tropecé con un principio fundamental propuesto por el físico francés Pierre Curie, según el cual causas simétricas han de producir efectos igualmente simétricos. Me pareció que siendo yo un hombre con simetría bilateral, debería poder caminar de forma bilateralmente simétrica. Para conseguirlo, he de lanzar a la vez ambas piernas hacia delante."

Tarzán ejecutó una vez más el movimiento, para que Jane lo viese. Cayó sobre un palo aguzado y chilló dolorido, "¡*Ayayaaaay*!"

"Me parece que no lo has entendido bien", dijo Jane.

"Para no haberlo entendido, bien que me ha dolido", replicó Tarzán, señalando la considerable matadura que se había hecho en la pierna.

"Quiero decir que has interpretado mal el principio de Curie. Para empezar, si quisieras conseguir una deambulación bilateralmente simétrica podrías ir a saltos como los canguros." Ella dobló los codos y con los brazos pegados a los costados, saltó varias veces a pies juntillas. Tarzán observó fascinado el ejercicio. Reunió finalmente el valor suficiente para preguntar en qué consistía la deambulación.

"La deambulación consiste en una serie ordenada de movimientos de las extremidades con el fin de conseguir la locomoción", explicó Jane. "Los animales se valen de toda suerte de métodos ambulatorios para ir de un sitio a otro. Los humanos caminan, los caballos galopan. Las gacelas pueden incluso saltar a la vez sobre las cuatro patas."

"Avanzar a saltos está todo correcto", dijo Tarzán, "pero sólo demuestra que la deambulación con simetría es posible. En la lectura que yo doy al principio de Curie todas las formas de deambulación de los humanos —y de todos los animales con simetría bilateral— tendrían que presentar simetría respecto a un plano". Dio caviloso unos pasos por el calvero. "Sin embargo, la mayoría de ellas no la tienen."

Jane le observó, esforzándose en imaginar qué aspecto ofrecerían sus andares vistos en el espejo. "Casi es así. Cuando observamos los andares de alguien por reflexión en un espejo, lo que vemos sigue siendo el andar de una persona." Se interrumpió un momento. "Así tiene que ser, claro, porque si no la gente tendría un aspecto muy raro vista en el espejo. Pero imagino que nada de esto es concluyente."

"La diferencia", comentó Tarzán, "es que, cuando adelanto mi pie derecho, la imagen reflejada adelanta el pie izquierdo. Ahora, en el paso siguiente, cuando yo adelanto realmente el pie izquierdo, la imagen reflejada adelanta el derecho. Uno y otra vamos siempre con el paso cambiado".

"No lleváis el paso cambiado, sino desfasado", corrigió Jane. "Por eso la reflexión de la marcha ofrece aspecto correcto en el espejo. Si se retrasa el tiempo en la cantidad necesaria para dar un paso, la imagen reflejada parece exactamente la misma que la original."

"¿Qué es fase?"

"El andar, lo mismo que cualquier otra forma de deambulación, es un movimiento periódico. Se repite regularmente a intervalos de tiempo iguales. Si se tienen dos copias del mismo movimiento periódico y una se retrasa un tiempo fijo con relación a la otra, la fracción de período que representa el retraso se denomina fase relativa. Al andar, tu pierna izquierda tiene con respecto a tu pierna derecha un desfase exacto de medio período, con lo que su fase relativa es 0,5.

"Lo cual —prosiguió Jane— es muy interesante, porque demuestra que todas las formas de deambulación presentan no sólo simetría espacial, sino también simetría temporal. Después de todo, una simetría no es más que una transformación que deja al sistema con el mismo aspecto que ofrecía al empezar. La propia periodicidad constituye una forma de simetría en el tiempo. Si se avanza o se retrocede en el tiempo un período entero, todo sigue mostrando idéntico aspecto. El caminar de los humanos exhibe una simetría espacio-temporal mixta: consiste en cambiar izquierda

por derecha con un desfase relativo de 0,5. ¿No es formidable?"

"Cuando tú saltabas... ¿la fase relativa era cero?", preguntó Tarzán, a ver si acertaba.

"¡Exactamente! Ya lo has entendido."

El hombre-mono se puso en pie de un salto, ejecutó una curiosa danza y volvió a darse una trompada contra el suelo. "Estaba tratando de conseguir una fase relativa de 0,3", explicó. "Todo consiste en lograr que mi pie izquierdo se retrase 0,3 de período con respecto a mi pie derecho."

"No estoy segura de que sea posible", manifestó Jane, "porque no se trata de una verdadera simetría. Pues mira, si todo ha de ofrecer el mismo aspecto que tenía después de intercambiar izquierda por derecha y efectuar un corrimiento de fase de 0,3, no sólo habría tu pierna izquierda de estar desfasada 0,3 con respecto a la derecha, sino que también la derecha habría de estarlo 0,3 con respecto a la izquierda. Y entonces la pierna derecha se encontraría en fase relativa de 0,3 + 0,3 = 0,6 consigo misma, lo que parece un poco absurdo."

"Amén de peligroso", añadió Tarzán frotándose con aire contrito la pierna que se había lastimado.

"¡Oye! ¡En todo esto hay un teorema!", exclamó Jane. "Si la reflexión izquierda-derecha se combina con un corrimiento de fase con el fin de conseguir una simetría, el desfase ha de ser de 0 o de 0,5. No hay ninguna otra posibilidad."

"¿Por qué?"

"Porque se puede aplicar nuevamente el mismo razonamiento. Si cada pierna tiene cierto desfase con respecto a la otra, cada pierna se desfasa con respecto a sí misma el doble de esa fase. Ahora, sólo es posible que una pierna se desfase con respecto a sí misma un múltiplo entero del período, porque a efectos, eso viene a ser lo mismo que no sufrir demora alguna. Así pues, el doble de tal desfase es 0, 1, 2, 3, etcétera, lo que implica que el desfase sea 0, 0,5, 1, 1,5 y así sucesivamente. Pero 1 tiene el mismo efecto que 0 y 1,5 el mismo que 0,5, a causa de la periodicidad.

"Lo que implica –prosiguió ella– que la deambulación de los bípedos solamente puede presentar esas dos simetrías, aparte, claro, de no presentar ninguna simetría. Me pregunto si realmente puede darse este caso..." Tarzán fue cojeando hacia ella, arrastrando una pierna. "¡Exactamente, eso es! Tarzán, parece que las coges al vuelo!"

"Pero lo que sigo sin entender, Jane, es por qué no funciona el principio de Curie. ¿Por qué son las formas de deambulación menos simétricas que el animal entero? ¿Por qué no van todos los cuadrúpedos dando saltos sobre las cuatro patas a la vez, como las gacelas?"

Justamente entonces llegó ambulando un elefante a través de un umbrío claro del bosque, barritando con la trompa un alegre saludo a sus amigos humanos. "La verdad", prosiguió Tarzán, "no creo que la naturaleza llegue a consentir jamás la existencia de un elefante saltarín como una gacela".

"Es posible que no. Pero donde realmente falla el principio de Curie es en la ruptura de la simetría", dijo Jane.

"¿Qué significa ruptura de la simetría?"

"Se produce cuando un sistema simétrico se comporta de modo no tan simétrico. Lo que importa es entender bien que el principio de Curie puede fallar. Déjame que te muestre cómo. ¿Dónde está Jim?"

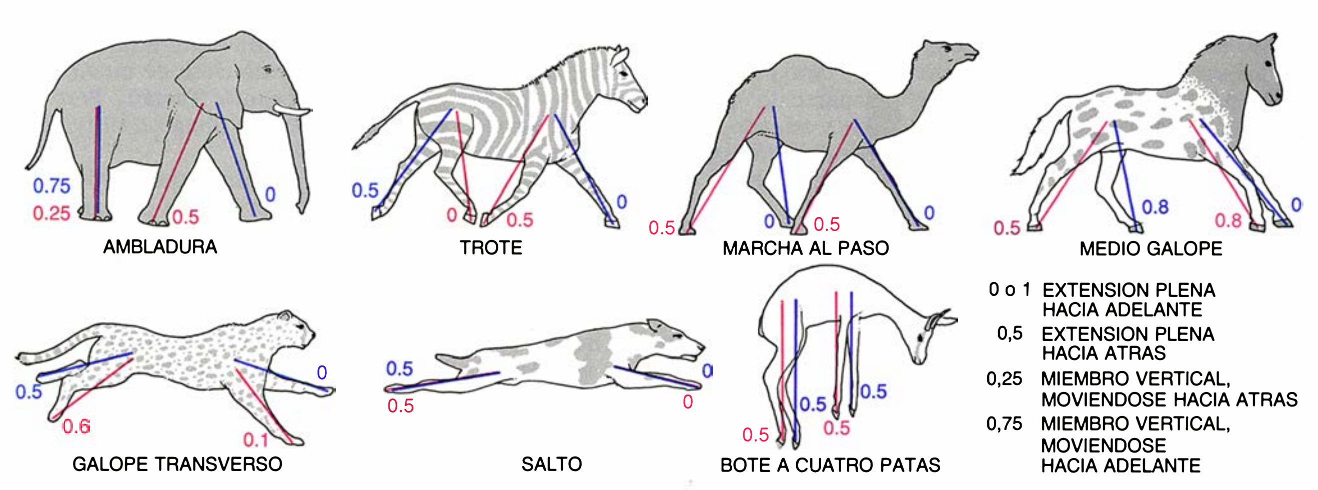
El joven Jim Panzee solía estar merodeando en torno a la cabaña, casi siempre, con ánimo de robar plátanos. Jane atrapó fácilmente al precoz primate. Seguidamente ató un nudo en el extremo de una liana y animó a Jim a trepar por ella ofreciéndole un plátano grande y maduro.

"Observa que cuando Jim se está quieto y la liana cuelga verticalmente hacia abajo, el sistema entero ofrece simetría circular", señaló Jane ufana de sí. Tarzán miraba, un tanto desconcertado. "Quiero decir que al caminar alrededor de él, ofrece sensiblemente igual aspecto desde todos los puntos de vista." Tarzán inspeccionó la cara de Jim y después dio la vuelta hasta el otro lado. "Tienes que imaginar que Jim es un montón informe y sin rostro." El hombre-mono afirmó feliz con la cabeza.

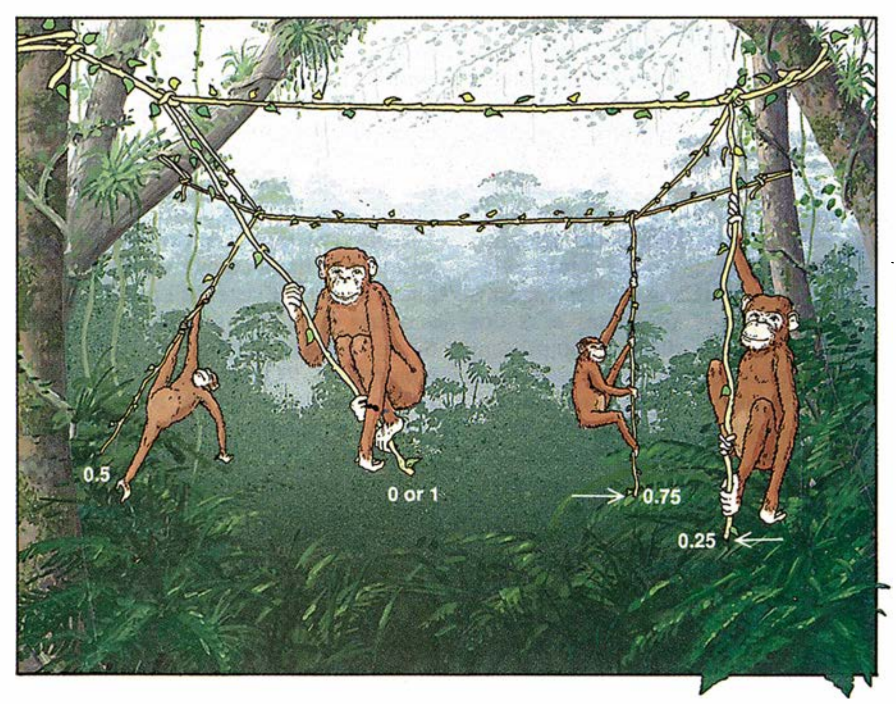
"Supongamos ahora que yo agarro la liana más abajo de donde se cae y pliega sobre esta rama y me pongo a tirar de ella arriba y abajo. La parte importante del sistema, que es la porción de liana que pende de la rama y a la que Jim está sujeto, sigue presentando simetría circular, a pesar de oscilar arriba y abajo. Pero, mira lo que sucede." Al ir Jane dando tirones de la liana, Jim empezó a oscilar, describiendo un arco, pequeño al principio pero después más y más largo. El chimpancé, encantado, soltó un chillido, agitó los brazos y saltó al suelo, concluyendo el experimento.

"He visto algo", dijo Tarzán, "pero no estoy seguro de lo que he visto".

"Has visto ruptura de simetría", declaró Jane. "El estado simétrico perfecto del sistema consiste en pender verticalmente. Cuando le doy tirones, el sistema se torna inestable. Aunque, en teoría, el estado simétri-



1. Siete sistemas deambulatorios básicos, en los que vemos las fases relativas de las patas.



2. Generador central de pautas de Tarzán

co inestable podría persistir, no se observa en la práctica porque cualquier minúscula perturbación aleatoria tiende a hacerse más pronunciada. Dado que el estado absolutamente simétrico no puede darse, el sistema ha de hacer alguna otra cosa que por fuerza habrá de ser menos simétrica."

"Ya veo."

"Que, sin embargo, no es totalmente asimétrica. Jim estaba oscilando de acá para allá en un plano. Si tal plano se considera un espejo, su vaivén es simétrico por reflexión. Tenemos ahí un ejemplo de onda estacionaria. Y eso no es todo." Volvió a levantar al chimpancé, lo apaciguó con otro plátano y le invitó a asirse nuevamente a la liana. "Jim puede también realizar una oscilación de otro tipo." Dio un empujón al simio y éste se puso a oscilar en círculos. "Se podría pensar que este movimiento tiene simetría circular, pero eso no es verdad; si uno hace girar el sistema un cierto ángulo, no ofrece exactamente el mismo aspecto."

"No, es como el andar visto en el espejo. El movimiento es del mismo tipo, pero en cada instante dado se encuentra en un lugar diferente."

"Así es. ¿Y qué significado tiene eso?"

"Que el instante ha sido mal tomado... claro. Volvemos a encontrarnos con un corrimiento de fase."

"Tarzán, ya lo has entendido. Si imprimes al sistema un movimiento de rotación y aplicas una demora temporal adecuada, ofrecerá exactamente el mismo aspecto que antes. Y en este caso el tiempo de demora es el mismo que el de rotación, en el sentido de que un giro de 0,4 de vuelta exige una demora de 0,4 de período, y así sucesivamente. Es lo que se conoce por una onda rotativa."

"Cuando el estado perfectamente simétrico se torna inestable, la simetría puede romperse para producir bien una onda estacionaria, bien una onda rotativa", razonó Tarzán. "La onda estacionaria tiene simetría puramente espacial: la reflexión en su plano. La onda rotativa posee una simetría espacio-temporal mixta."

"¡Exactamente, eso es!" Tarzán se aporreó el pecho y ululó en señal de triunfo mientras Jane movía la cabeza con desaprobación. La educación del hombre-mono todavía dejaba bastante que desear.

"Pero la simetría circular no ha desaparecido por completo", afirmó Jane asiendo rápidamente la liana y dándole un susto a Jim. "Elige un plano vertical que pase por lo alto de la liana."

"El que está alineado con aquel árbol de allá", quiso Tarzán. Jane empujó a Jim en aquella dirección; el chimpancé osciló adelante y atrás en el plano que Tarzán había elegido. "¿Para qué planos sucederá lo mismo?"

"Para cualquiera, supongo yo, con tal de que sean verticales y pasen por el punto en que la liana pasa sobre la rama", respondió el hombre-mono.

"En efecto. Son planos que pasan por el eje de simetría. ¿Y qué relación tienen estos planos entre sí?"

"Bueno... cada uno de ellos resulta de hacer girar a uno cualquiera de los demás. ¡Ya veo! En vez de tener un único estado del sistema invariable frente a todas las rotaciones —o sea, un estado plenamente simétrico— se obtiene un montón de estados menos simétricos, todos ellos relacionados entre sí por medio de giros."

"Precisamente. El conjunto entero de movimientos encierra todavía simetría circular, en el sentido de que si se hace girar uno cualquiera de los movimientos se obtiene otro movimiento perteneciente al conjunto. La simetría, más que romperse, es compartida."

En aquel momento, una bestia amarilla con manchas oscuras pasó disparada a través del calvero, rugiendo. Se abalanzó sobre Tarzán. Hubo un breve forcejeo, del cual emergió el hombre-mono luciendo una sonrisa de anuncio, mientras acunaba en sus brazos a un gran guepardo. "¡Mira, Jane, Manchado ha venido a visitarnos!"

"Sí, desde luego, y me parece que en su carrera ha efectuado lo que se denomina un galope transverso" —observó Jane— "que es una de las formas de deambulación menos simétricas".

"¿Qué simetrías tiene?", preguntó Tarzán.

"Puedes averiguarlas por los desfases", respondió Jane. "En el galope transverso, las patas diagonalmente opuestas tienen un desfase relativo de 0,5. Existe también un curioso desfase de 0,1 entre las patas delantera izquierda y delantera derecha, que no voy a explicar, excepto para decir que probablemente tenga que ver con el eficiente uso de energía en el animal. La simetría es como sigue: intercambio de pares de patas diagonales y desfase de medio período."

"¿Qué clase de ruptura de simetría podría crear esta clase de movimiento?", se preguntó Tarzán. Pero la puesta del sol les obligó a suspender sus experimentos.

Al día siguiente, Jane se vio despertada por una mezcla de parloteos y roncos chillidos. Al mirar hacia el calvero vio a Tarzán acompañado de una banda de chimpancés. Tarzán había confeccionado una compleja red de lianas entre cuatro árboles y estaba esforzándose en convencer a unos chimpancés jóvenes para que trepasen a los extremos colgantes de cuatro lianas, sobornándoles con plátanos.

"Es un modelo de lo que en biología se conoce por un generador central de pautas", dijo Tarzán lleno de

satisfacción. "Cada chimpancé representa un componente del circuito nervioso que gobierna una pata. Las lianas son interconexiones que acoplan las neuronas entre sí, con el fin de que unas influyan en otras. La dinámica del sistema controla los ritmos deambulatorios. ¡Fíjate!" Le dio un empujón a uno de los chimpancés y el animal empezó a oscilar; los impulsos transmitidos a lo largo de las lianas de enlace pusieron pronto a otros chimpancés en oscilación por simpatía. Estaba a punto de instaurarse una pauta periódica bastante compleja cuando uno de los chimpancés saltó de la liana y se fue a robar otro plátano.

"No es más que un pequeño problema de soporte físico (hardware)", explicó el hombre-mono. "Cada red consiente toda una gama de oscilaciones. Tal es el motivo de que un animal pueda emplear diversos sistemas de deambulación, dependiendo de la velocidad, el terreno, etcétera. Puedo simular la mayoría de los métodos de deambulación mediante un montaje cuadrado con lianas. Lo que me llama la atención es que el único que no puedo simular sea el caminar a cuatro patas, como hace el elefante, que es una especie de onda rotativa en forma de 8, en la cual las patas delantera izquierda, trasera derecha, delantera derecha y trasera izquierda se van moviendo al compás, con desfases relativos de 0,25. Aunque sí puedo simularlo si redispongo las lianas haciendo que se crucen dos de las conexiones."

"Vamos a ver si comprendo lo que estás dando a entender", dijo Jane. "Estás examinando redes de osciladores acoplados y estás averiguando qué clases de ruptura de simetría se pueden dar. Después estás tratando de asimilar los resultados con las formas verdaderas de deambulación, en la hipótesis de que cada pata esté controlada por un oscilador."

"Sí, aunque en la práctica, cada oscilador, como tú lo llamas, podría ser un circuito complicado. ¡Y funciona! Mira, supongamos que quieres marchar a brincos. Entonces ajustas las dos 'patas' delanteras para que se muevan juntas y sincronizadas —se fue corriendo al otro extremo del claro— y haces lo mismo con las dos patas traseras, pero con un desfase relativo de 0,5. Desde luego, podemos hacer que los chimpancés comiencen a balancearse en cualquier disposición que se nos ocurra, pero sólo hay unas pocas que persistan duraderamente; todas las demás se tornan rápidamente en confusión. Me figuro, pues, que éstas serán las pautas naturales de oscilación de la red. No hay ninguna dificultad en conseguir el trote, la marcha al paso y el salto a cuatro patas.

"Los dos tipos de galope no son mucho más difíciles, pero lo que me está costando de veras es persuadir a estos monos para que salga el paso largo o medio galope, puedes creerme. Seguramente me harán falta más plátanos para resolver el problema."

"Tarzán, lo que has hecho es verdaderamente impresionante...", comenzó a decir Jane, pero el hombre-mono se había metido entre los arbustos, gritando, "¡Los insectos! ¡Tendría que funcionar también para los insectos!" Reapareció agitando un escarabajo verde, que depositó sobre una roca. Tras una primera salida insegura y prevenida, el insecto echó a andar.

"Deambulación tripódica", observó Jane. "Las patas marchan a la vez en dos tríos, desfasados 0,5 el uno con relación al otro. Unas simetrías muy bonitas." Al caer la tarde, Tarzán había montado un sistema de seis lianas conectadas por un hexágono; seis chimpancés perplejos estaban columpiándose en simulacro de la deambulación tripódica. Tres monos de un lado oscilaban con desfase 0,5 respecto a los tres del otro.

Justo tras amanecer el día siguiente, Jane se despertó con la más fenomenal algarabía que había oído en su vida. Al asomarse al exterior pudo ver a Tarzán talando árboles para abrir un sendero a través de la jungla. En uno de los extremos de la senda yacía un enorme montón de lianas; en el otro, una pila de plátanos mayor que su cabaña. Los chimpancés correteaban y saltaban por todas partes.

Jane se preguntó por qué habría Tarzán de recabar la ayuda de cien chimpancés. La respuesta le causó el mismo impacto que un elefante saltarín: ¡Tarzán quería estudiar los... ciempiés!

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SYMMETRICAL GAITS OF HORSES. Milton Hildebrand en *Science*, vol. 150, págs. 701-708; 5 de noviembre de 1965.

HOW MAMMALS RUN: ANATOMICAL ADAPTATIONS. P. Gambaryan. Wiley, 1974.

NEURAL CONTROL OF RHYTHMIC MOVEMENTS IN VERTEBRATES. Avis H. Cohen, S. Rossignol y S. Grillner. Wiley, 1988.

A SYNERGETIC THEORY OF QUADRUPEDAL GAITS AND GAIT TRANSITIONS. G. Schöner, W. Y. Jiang y J.A.S. Kelso en *Journal of Theoretical Biology*, vol. 142, n.º 3, págs. 359-391; de febrero de 1990.

Libros

Historiografía, Gödel, resonancia magnética, evolución de los primates y ciencia helvética

Mikel de Epalza, Javier de Lorenzo, Francisco J. Sánchez, Jorge Agustí y Luis Alonso

De Abd al-Rahman I a Isabel II, por Juan Vernet. Promociones y Publicaciones Universitarias, S.A.; Barcelona, 1989.

Tras ese peregrino título, el libro del profesor Juan Vernet Ginés recoge 43 trabajos del catedrático de Estudios Arabes e Islámicos de la Universidad de Barcelona, precedidos de una bibliografía y distribuidos en los siguientes epígrafes: 1. Coránica; 2. Onomástica; 3. Ciencia, tecnología y medicina; 4. Literatura; 5. Historia.

Los trabajos sobre historia de la ciencia son los más importantes, aunque no son más que el complemento de otro volumen de artículos recopilados anteriormente en sus *Estudios sobre historia de la ciencia medieval*. Son estudios monográficos, generalmente puntuales y anecdóticos, que completan su voluminosa *Historia de la ciencia española*. Este volumen de reimpresiones muestra bien la amplia dimensión cultural e histórica que Vernet tiene en cuenta cuando realiza sus investigaciones particulares, como puede verse en la mera presentación de los principales capítulos científicos de este volumen.

La originalidad de la ciencia árabe establece desde sus primeras líneas que "uno de los problemas más apasionantes que pueden plantearse a un historiador es el de la capacidad creadora de los distintos pueblos". Con ejemplos conocidos y con textos árabes que se editan por primera vez en español muestra cómo empezó la ciencia entre los árabes y cómo perfeccionaron los conocimientos recibidos, en diversos campos. Su estudio sobre las traducciones científicas como índice significativo de la originalidad creadora de los árabes es particularmente interesante.

La matemática árabe y *La alquimia* no sólo presentan las principales aportaciones árabes a esas ciencias medievales, especialmente en Al-Andalus, sino que muestran algunas continuaciones de esas aportaciones en la Europa pre-renacentista y renacentista. No lo expone con términos generales, a modo de artículo de enciclopedia, sino con ejemplos y textos concretos.

Cartografía e imagen de la España medieval, *El Universo en la Edad Media*, *España en la geografía de Ibn Sa'îd Al-Magribî* y *Textos árabes de viajes por el Atlántico* completan otros estudios suyos sobre las visiones espaciales de los árabes y otros pueblos, con sus representaciones cartográficas y cálculos matemáticos. Aquí, la ciencia histórica tiene que relativizarse gracias a una consideración antropológica, casi etnológica, ya que la ciencia de los espacios se convierte en la ciencia de las visiones de los espacios. La geografía cartográfica, tan segura para nosotros que en ella se colocan los lugares y acontecimientos lejanos, aparece relativizada con estos estudios históricos.

Ciencia hispanoislámica y la mihna se refiere al control ideológico islámico por parte de las autoridades, institución que se ha querido comparar con la Inquisición cristiana y que Vernet reduce a sus justos límites. Trae datos y textos acerca de ese control religioso, especialmente en Al-Andalus.

Las obras biológicas de Aristóteles en árabe: el evolucionismo en Ibn Jaldûn presenta algunos datos nuevos, así como los breves trabajos titulados *The Dominican, the Benedictine and the Moon*, sobre antecedentes astronómicos de Giordano Bruno y Gervasio de Canterbury en un texto andalusí del siglo XI, y *Una nota sobre hidráulica*.

Muchísimos más datos trae su importante aportación *Algunos fenómenos astronómicos observados bajo los Omeyas españoles* y sobre todo *El Valle del Ebro como nexo entre Oriente y Occidente*, verdadera suma de informaciones sobre el papel de esa región en la transmisión de saberes en la alta Edad Media.

Curiosas informaciones sobre aparatos astronómicos y mecánicos fabricados en la Península contienen sus trabajos *Mármol, obra de Zarquel*, *Un texto árabe de la corte de Alfonso X el Sabio*, *Un tratado de autómatas*, *Alfonso el Sabio y la mecánica*, *Alfonso el Sabio: mecánica y astronomía*, que nos dan a conocer unas curiosas reconstrucciones gráficas de esos autómatas.

Los trabajos científicos de este volumen terminan con otros trabajos puntuales, sobre distintas épocas: *Un manuscrito interesante de la Real Academia de la Historia*, sobre un viajero granadino del siglo XII, *Un astrónomo español del siglo XVI*, Jerónimo Muñoz, *Kepler y los horóscopos de Mahoma y Lutero*, *El cálculo infinitesimal y la matemática española del siglo XVIII*, *Un acadèmic de la Reial Acadèmia de Ciències de Barcelona i la ciència a la Barcelona romàntica (regnat d'Isabel II)*.

La mera presentación de estos títulos muestra la variedad de estos trabajos de Juan Vernet Ginés, académico, catedrático, miembro de muchas instituciones científicas y, sobre todo, curioso investigador. (M. E.)

Reflections on Kurt Gödel, por Hao Wang. The MIT Press. Cambridge, Massachusetts; 1988.

Los teoremas de Gödel llevaron a cierta crisis en la filosofía de la matemática, hace ahora sesenta años. Gödel vino a probar que un sistema formal lógico que pretenda captar una teoría matemática tan "elemental" como la aritmética no podrá demostrar su no-contradicción o consistencia –segundo teorema– ni será completa ni completable –primer teorema–, en el sentido de que habrá proposiciones verdaderas en esa teoría matemática, pero indemostrables en el sistema formal. El concepto "verdad matemática objetiva" se hacía, así, distinto del concepto "demostración". El mito que quería cierta la frase de que quien dice matemática dice demostración, se venía abajo. La formalización mostraba unos límites insalvables.

El método utilizado por Gödel para la demostración de sus teoremas, la aritmetización del sistema formal, supuso el manejo de las funciones aritméticas primitivo-recursivas que, en manos de Turing, pasaron a una formulación equivalente respecto a una clase de funciones aritméticas más extensas, las recursivas, ahora convertidas en funciones computables. Una formulación que supuso, para Gödel, la culminación de uno de los aspectos de su trabajo y uno de los logros centrales del pensamiento matemático: la caracterización precisa de una noción intuitiva como la de algoritmo o proceso computable.

Turing planteó una problemática ligada a los teoremas de incompletitud e inconsistencia: si hay proposiciones indecidibles –verdaderas pero no demostrables–, es decir, si no hay procesos algorítmicos finitos que permitan decidir esa demostración, entonces una máquina Turing y una mente humana, ¿son distintas? En otras palabras: ¿puede pensar una máquina? Volvía, así, un viejo tema racionalista, el mecanicismo, pero ahora con una nueva versión que agregar a la ambigüedad tradicional del término: ser computable o recursivo, y si esa computabilidad puede trasladarse a la máquina.

Gödel señaló que de sus teoremas tomados de modo único no se deduce que el espíritu humano sobrepase a la máquina. Hay que agregar otras suposiciones. Básicamente, la que considera que "el espíritu, en su uso, no es estático, sino que está desarrollándose constantemente". Es hipótesis que supone, en Gödel, otra más importante: la admisión de que hay espíritu y materia, y que ambos están separados. Con estas suposiciones, sus teoremas sí pasan a convertirse en una refutación, ahora pretendidamente formal, del mecanicismo.

Nacido en la ciudad de Brno, el 28 de abril de 1906, estudia en Viena, donde publicará sus trabajos sobre la completitud de la lógica elemental y dará sus grandes teoremas de limitación, para pasar a Estados Unidos, donde trabajará en el tema de la consistencia de la hipótesis del continuo y el axioma de elección en la teoría axiomática de conjuntos. Son trabajos, centrales, que realiza entre 1930 y 1941: doce años de absoluta intensidad en el campo matemático, de los 24 a los 36 años de edad. De salud delicada, Gödel tendrá épocas de presión que, con la edad, fueron acentuándose. A mediados de diciembre de 1977 ingresa en el Hospital de Princeton, manifestando una fuerte hipocondría; el 14 de enero de 1978 fallece por "malnutrición e inanición" causada por una "personalidad perturbada", como indicará el parte médico.

Hao Wang, autor de numerosos ensayos y libros sobre lógica, tratará a Gödel durante los últimos años de la vida de éste. Ya en 1976 redacta un texto, *Algunos hechos sobre K. Gödel*, que el matemático checoslovaco-austríaco-norteamericano pedirá que sólo se edite póstumamente. Publicación realizada por Wang, al igual que la de una serie de cartas, manuscritos y conversaciones mantenidas por ambos durante esos últimos años. Es una relación que posibilita un conocimiento muy íntimo de la personalidad gödeliana. Y si bien se van editando los trabajos lógico-matemáticos de Gödel en *Obra completa* –dos volúmenes, ya– bajo la dirección de Fefermann en estos momentos, con la esperanza de que se publique, íntegro, el *Nachlass* gödeliano, Wang se ha convertido en una de las mayores fuentes de información para el conocimiento de las ideas de Gödel. Ideas que, en algunos casos, parecen contenerse en esos manuscritos inéditos que, al estilo de Leibniz, Gödel fue realizando con ánimo de una edición póstuma.



Kurt Gödel recibe de manos de Albert Einstein el premio del mismo nombre que Princeton concede. Es el 14 de marzo de 1951. De izquierda a derecha: Einstein, Lewis Strauss, Gödel y Julian Schwinger.

Desde esta perspectiva, la obra *Reflections on K. Gödel* de Wang constituye una muy buena fuente de información. Interés indudable que viene empañado, sin embargo, por el absoluto desorden con el que Wang realiza su labor, y, a la vez, porque Wang pretende una obra de reflexión sobre Gödel y, presentando las ideas del mismo, trata en ocasiones de manifestar las suyas propias.

Tras una breve introducción y cronología, que alcanza hasta la edición, en 1986, del primer tomo de las obras completas, *Reflections* se divide en tres partes y once capítulos: 1) *Hechos*. Compendio de información biográfica e histórica sobre Gödel, su obra, su época (4 caps.); 2) *Pensamientos*. Un trabajo que se quiere preliminar para mostrar los acuerdos y desacuerdos del autor (Wang) con Gödel (5 caps.) y 3) *Escritos matemáticos*. Un mero suplemento con introducción y comentarios sobre los cinco ensayos más importantes de Gödel (2 caps.) Los ensayos matemáticos discutidos son el de la completitud de la lógica de predicados, incompletitud de la aritmética, la hipótesis del continuo, el logicismo y el realismo de Gödel, la teoría constructiva e iterativa de conjuntos.

Wang compara a Gödel, como matemático, con Arquímedes y Gauss; como filósofo-científico, con Descartes y, sobre todo, con Leibniz. Y ello porque, para Wang, Gödel fue más que matemático. Y subrayará la pretensión gödeliana de hacer de la filosofía una ciencia exacta, pretensión que estima podrá alcanzarse dentro de unos cien años como mucho; así como la idea de que podrán refutarse el mecanicismo en biología, la proposición "no hay espíritu separado de la materia" y la afirmación de que las leyes físicas en sus consecuencias observables tengan un límite finito de precisión. Son ideas para las que Gödel pretenderá iniciar el camino manteniendo su confianza en que podrán ser demostradas mediante teoremas matemáticos. Por otro lado, Wang indica la pretensión de Gödel de elaborar una "religión racional", según le expresara en sus conversaciones. Como Leibniz, la mayoría de las ideas filosóficas de Gödel parecen encontrarse en sus papeles sin editar.

En esta primera parte, se recuerda la amistad y relación de Gödel con Einstein, el Círculo de Viena, Wittgenstein, el Programa finitista de Hilbert... Y queda claro el hecho de que Gödel dedicó su labor más intensa entre 1930 y 1941 a los temas de completitud de la lógica, la incompletitud de la aritmética y la consistencia re-

lativa de la hipótesis del continuo. Desde 1943, se vuelve a la filosofía, pero sólo publicará un par de ensayos, en homenaje a Russell y al problema del continuo de Cantor.

El recorrido histórico es interesante para los lógicos. Especialmente por la insistencia de que el trabajo de Gödel queda aislado de la atmósfera intelectual de los años veinte, marginándose, así, a la influencia que pudiera tener en su obra el Círculo de Viena, con el rechazo explícito de Gödel del positivismo lógico.

La parte 2, *Pensamientos*, vuelve en círculo a los temas centrales de la filosofía gödeliana. Y ello porque Wang considera que la vida es más asequible que los pensamientos, pero que sólo por la captación de éstos cabe alcanzar una comprensión profunda de la primera. Ahora bien, la presentación de dichos pensamientos no puede ser la genética sino que, básicamente, ha de ser una presentación conceptual. Y una exposición conceptual "que considere los puntos esenciales en el contexto de interés suficientemente universal" (p. 145) se le muestra a Wang posible por dos vías: *a*) contrastar el pensamiento de Gödel con el de Einstein; *b*) "considerar el pensamiento de Gödel sobre los temas eternos que interesan también a los especialistas" (íd.). Dos vías capaces de estimular el poder de nuestra imaginación. En *a*) Wang contrapone las actitudes religiosas, políticas, públicas de Gödel y Einstein, así como las diferencias de ambos en cuanto a las relaciones de la matemática con la física, por un lado, y de la matemática con la filosofía, por otro. En *b*) señalará, como alguno de los temas eternos, los siguientes: ¿Es el espíritu algo más que una máquina? Nuestro conocimiento de la matemática ¿hasta dónde llega en su amplitud? ¿Hasta dónde son reales el espacio y el tiempo? ¿Es adecuado el darwinismo para dar cuenta de los orígenes de la vida y del espíritu? ¿Hasta dónde puede ser precisa la física? ¿Hay un más allá?

Los temas que Wang trata de desarrollar como estímulo para nuestra imaginación, los pensamientos de Gödel, los agrupa en dos apartados: los conceptos en ciencia y tecnología, que comprende los computadores y los procesos mecánicos, la praxis y naturaleza de la matemática, las teorías de la relatividad y el concepto de tiempo; los conceptos de filosofía.

El realismo conceptual de Gödel muestra dos aspectos: por un lado, una concepción objetivista de la matemática y, por otro, un realismo conceptual o matemático. Según Wang, el objetivismo supone un acuerdo general en la aceptación de la demostración matemática y su conclusión. Acuerdo general que es el que muestra la objetividad y la universalidad de la matemática. No me queda claro si tal acuerdo es adoptado "democráticamente" o si el mismo es algo que se impone a todos los matemáticos, que es lo que parecería desprenderse de los escritos explícitos gödelianos; de otra manera tal objetivismo vendría teñido de un relativismo absoluto. Que el matiz objetivista sea el primero viene implícito cuando Wang indique que ese objetivismo requiere también la objetividad en el sentido de admitir un concepto de verdad apoyado en la ley del tercero excluido. Y, según esta dinámica del pensamiento del autor chino, esa objetividad exige el dato de los objetos matemáticos. "Es difícil imaginar cómo podemos pensar objetivamente sin pensar acerca de algo" (p. 188). Dificultad que parecen no sentir otras escuelas de pensamiento matemático a las que Wang no menciona. Aquí introduce unas citas de Bernays en las que apoyar el realismo matemático, un realismo centrado en unos objetos que poseen una realidad diferente a la de los cuerpos físicos. Se rechazan –y éste es todo el argumento– las ideas de que los objetos sean meros nombres –en la línea del formalismo– o constructos conceptuales –en la línea del intuicionismo–, sin mayores aclaraciones.

Naturalmente ello conduce a cómo captar esos objetos matemáticos, tan reales pero con realidad distinta a la física, a la realidad material. Y aquí Wang cuenta cómo Gödel conjetura la existencia de un órgano físico "estrechamente ligado al centro neuronal del lenguaje" (p. 190). A la búsqueda de una nueva glándula pineal, Wang indica que es conjetura que puede ser fecundo campo de investigación para la neurofisiología.

Para Wang el concepto de intuición de Gödel es algo más amplio que el kantiano, pero se olvida de precisar que en Kant hay dos tipos de intuición, la sensible y la pura. Y, por otro lado, esa intuición parece quedar ligada a un proceso de idealización que conduce a establecer toda una gama creciente de certeza y racionalidad. Gama de certeza que va, en sentido ahora decreciente, desde los números pequeños a los grandes, a la totalidad de los números naturales, teoría predicativa de conjuntos, definiciones impredicativas y operación potencia conjuntista, hasta llegar a los axiomas tipo el de reemplazamiento y a los cardinales cada vez más amplios terminando por los cardinales inaccesibles. Intuición e idealización que se conjugan en una especie de dialéctica que, para Wang, se sitúa como clave para el manejo de los objetos matemáticos y los conceptos que los subtienden. Pero, realmente, y a pesar de la mucha atención que parece destinarse a estos temas, no se me muestran muy claros.

Pasa lo mismo con la afirmación de Wang de que "las categorías básicas de la ontología de Gödel (es decir, las 'cosas', o todo lo que existe) son objetos y conceptos" (p. 193). Los objetos consisten en "objetos matemáticos –es decir, conjuntos 'puros'– y otros" (íd.), lo que, en el fondo, no es decir mucho. Para, a continuación, aclarar que los conjuntos están "incluidos en los conceptos" (p. 194), lo que viene a identificar los objetos matemáticos con los conceptos en los cuales se encuentran incluidos y anular, así, las dos categorías.

Wang pasa a explicitar uno de los temas gödelianos de los que algo se venía discutiendo pero siempre en nebulosa: la demostración de la existencia de Dios, que Gödel hizo circular a partir de 1970. Wang, sin embargo, declara marginarse explícitamente del tema: expone dicha prueba sin entrar a discutirla. Se declara incompetente en estos temas. No así en el intento gödeliano de axiomatizar la metafísica, aunque reconozca que no ha logrado especificar los conceptos primitivos en que dicha axiomática debe apoyarse.

Una vez más se vuelve al tema del mecanicismo, donde Gödel cree que el "mecanicismo en biología será refutado". Refutación mediante un teorema matemático que muestre que la probabilidad de formar un cuerpo humano dentro de los tiempos geológicos (por las leyes de la física, admitiendo una distribución aleatoria de la "materia") es infinitamente pequeña. Teorema que también puede demostrarse reemplazando "cuerpo humano" por "organismo viviente".

El teísmo de Gödel no se plasma tan sólo en su intento de demostración de la existencia de Dios, sino que Wang vuelve a él bajo el epígrafe de *metafísica religiosa*. Y recuerda que Gödel le sugirió en una ocasión que estudiara teología (racional) como parte adecuada de una educación en filosofía (p. 212). Imprescindible, evidentemente, para los temas metafísicos de Dios, la inmortalidad y la libertad, reconocerá Wang. Pero que muestran una de las diferencias más radicales que tendrá respecto a Gödel y que le conducirán a señalar el papel de los condicionamientos sociales para la filosofía. Gödel, en 1961, escribió cuatro largas cartas a su madre, Marianne, dándole razones para

creer en un mundo del más allá. Para Wang ello supone la más clara manifestación de un "optimismo racional" como propio de Gödel, a pesar de que "el razonamiento en sus cartas es prudente... no se conoce qué grado de certeza asignaba Gödel a sus componentes separados" (p. 214). El argumento encierra dos etapas: la ciencia muestra que el mundo está racionalmente ordenado; pero sin una vida futura las potencialidades de cada persona y los preparativos en esta vida carecen de sentido. Gödel recuerda a Leibniz y llega a la afirmación: "La idea de que todo en el mundo posee significado (y razón) es un análogo exacto del principio de que todo tiene una causa, sobre el cual reposa toda la ciencia" (p. 217).

Pese a su mencionada oscuridad, el libro de Wang constituye, y reitero, una magnífica fuente de información para poder seguir, y calibrar, los pensamientos hasta ahora inéditos de Gödel, una de las figuras, sí, centrales del pensamiento del siglo xx. (J. L.)

NMR: PRINCIPLES AND APPLICATIONS TO BIOMEDICAL RESEARCH. Dirigido por Jay W. Pettegrew. Springer Verlag; Berlín, 1990.

La resonancia magnética nuclear (RMN) es una de las técnicas espectroscópicas no destructivas ni invasivas más potentes de que se dispone en la actualidad. Muy útil en química, facilita la obtención de información exhaustiva sobre la estructura, configuración y conformación molecular.

Menos conocidas, pero con un impresionante desarrollo en los últimos años, son las aplicaciones de la RMN a la bioquímica, biología y medicina. En estos campos, la introducción de la RMN como herramienta para el estudio de los seres vivos, de su estructura interna y su metabolismo y bioquímica, está originando una auténtica revolución. Ello se debe esencialmente a que la RMN posibilita la investigación molecular en condiciones fisiológicas de los mismos. Por otro lado, las técnicas de creación de imágenes por RMN compiten ventajosamente con la tomografía axial computarizada y otras técnicas en el estudio de las estructuras internas. Imágenes de muy alta calidad que suelen aportar más información que la mera representación del corte.

La situación de desconocimiento de las posibilidades reales de la RMN en su vertiente biológica y, en concreto, en el área de la biomedicina es el origen del libro reseñado. Su objetivo es, pues, estimular el interés hacia la RMN y aproximarse a su potencial a través de la presentación de una serie de trabajos recientes.

La obra interesa a los investigadores en biomedicina y áreas afines, a quienes ofrece una serie de trabajos sobre problemas reales que hacen tangible el valor de la RMN: aplicación de la RMN de ^{31}P a la investigación del ojo, espectroscopía RMN de tumores y espectroscopía *in vivo* de ^{31}P de cerebro humano adulto, entre otros.

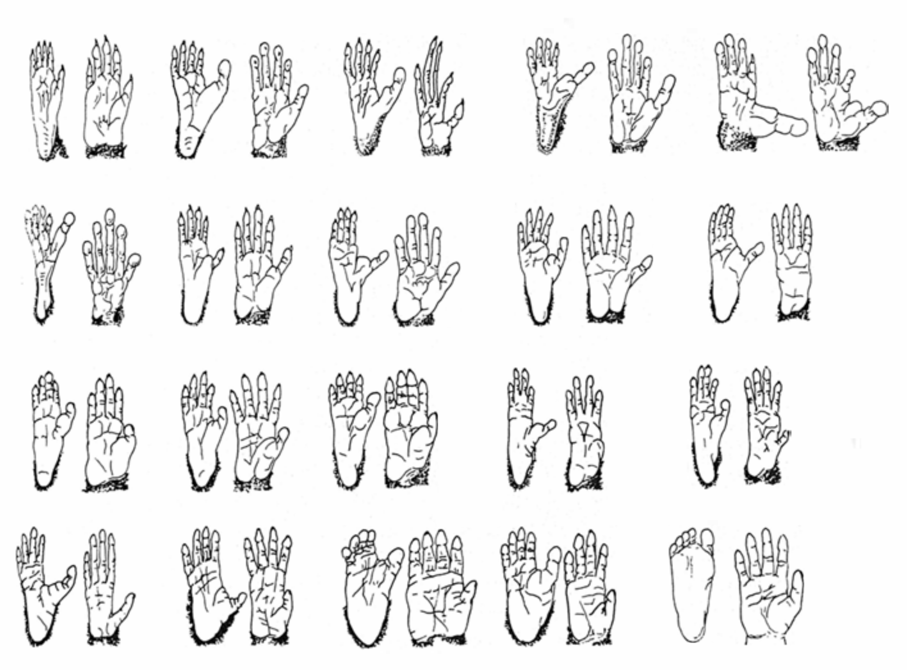
El conjunto se articula en cuatro bloques, acordes con las cuatro técnicas básicas de la RMN. Se aborda la resonancia magnética nuclear de alta resolución, aplicada al estudio estructural de biomoléculas en disoluciones homogéneas. Estudia la RMN de sólidos (estructuras ordenadas con poca movilidad, membranas y sus componentes); se ocupa, luego, de la RMN *in vivo* para el estudio de la bioquímica o metabolismo de organismos vivos, mediante observación del núcleo que nos permita reconocer los marcadores de la actividad a investigar (en general ^{31}P, ^{23}Na y en algún caso ^{1}H, ^{13}C o ^{7}Li). Por último, la construcción de imágenes de RMN.

Dado que son los dos últimos puntos los que señalan las aplicaciones específicas de la biomedicina, no es de extrañar que buena parte del libro se consagre a ellos. A modo de ejemplo, se puede determinar el índice metabólico de un tejido a través de la RMN de ^{31}P observando las diferentes especies de compuestos de fósforo presentes, o determinar el *p*H sin necesidad de introducir en el tejido sonda alguna de medición.

Para su mejor comprensión, se detallan los principios básicos de la RMN en cada uno de los cuatro aspectos. Aunque, dada la complejidad de la técnica, difícilmente los seguirán quienes estén alejados de ese campo. Podría sacársele mayor partido si se expusiera de forma sencilla y descriptiva la instrumentación y técnicas básicas de trabajo para los principiantes. (F. J. S.)

PRIMATE ORIGINS AND EVOLUTION. A PHYLOGENETIC RECONSTRUCTION, por R. D. Martin. Chapman and Hall; Londres, 1990.

Como en el caso de *El origen de las especies*, el título de esta obra no da una idea exacta de su contenido. En efecto, de lo que precisamente *no* trata el libro de R. D. Martin es del origen y evolución de los primates (y menos de la reconstrucción filogenética del orden). En realidad, y pese a su carácter enciclopédico, nos hayamos ante un trabajo de investigación original, cuyo fin sería acotar una definición plausible de primate. Sólo desde esta perspectiva se entiende que tal definición se encuentre aquí formando parte del capítulo final, en la página 637 del libro. *Primate origins...* se inicia con un primer capítulo de revisión de las actuales formas vivientes, en el cual se deja clara cuál va ser la posición del autor a lo largo



Visión ventral (palmar y plantar) de la mano y el pie derechos de distintas especies de primates. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Tupaia, Lemur, Daubentonia, Galago *y* Nycticebus, *en la fila superior;* Tarsius, Leontopithecus, Aotus, Cebus *y* Ateles, *en la segunda fila;* Cercopithecus, Macaca, Papio, Colobus *y* Presbytis, *en la tercera fila;* Hylobates, Pongo, Gorilla, Pan *y* Homo, *en la fila inferior.*

del volumen: en la reconstrucción filogenética y en la clasificación de los primates sólo deben tenerse en cuenta las especies actuales; los fósiles, por tanto, entran en un segundo plano. Martin distingue entre "fósiles fragmentarios" (mandíbulas y dientes aislados, que no deben ser considerados) y "fósiles substanciales".

El segundo y tercer capítulos están dedicados, respectivamente, al registro fósil de los primates y a su clasificación. Martin se ve obligado a utilizar términos sin validez taxonómica como "primate arcaico" o "primates de aspecto moderno", y cuyo sentido es, por lo demás, confuso. En cuanto al tercer capítulo, referente a clasificación y reconstrucción filogenética, el autor reconoce el valor de la sistemática cladística en la reconstrucción filogenética, pero niega su aplicación a la clasificación. Para Martin, la existencia de ciertos "problemas prácticos" (reducidos, en el fondo, a la clásica obsesión profesoral por la "estabilidad de la nomenclatura") aconseja que ambas cuestiones deban ser tratadas independientemente.

Tras estos primeros capítulos, en los que se sientan las coordenadas teóricas de la obra (preeminencia del estudio de las formas actuales, rechazo del registro fósil considerado fragmentario y divorcio entre sistemática y clasificación), sigue un extenso capítulo dedicado al origen y primera radiación de los mamíferos. De nuevo aquí nos encontramos ante la paradoja de que, pese a su rechazo del registro fósil, Martin lleva su análisis de la evolución temprana de los mamíferos nada menos que hasta las faunas de pelicosaurios y terápsidos del Pérmico y del Triásico. Martin aborda el tema de los tupaias, bien conocido por el autor del libro. En él se compara el modo de vida y los rasgos anatómicos de este grupo, en relación con algunos esciúridos tropicales, encontrando convergencias sorprendentes. De hecho, admite que los tupaias corresponden a terios poco evolucionados, sin que exista una vinculación estrecha con los primates.

Del capítulo 6 al 10, Martin realiza un repaso en profundidad de diversos rasgos anatómicos en los primates: dentición y tracto digestivo, cráneo y órganos de los sentidos, sistema nervioso central, biología de la reproducción y aparato locomotor. Acomete un análisis documentado de cada una de estas facetas de la evolución de los primates, basándose, sobre todo, en los representantes actuales. En el inevitable capítulo sobre locomoción, recoge la observación desarrollada por Cartmill, para quien existiría ya en el origen de ambos grupos una segregación ecológica entre roedores y primates, según la cual roedores y pequeños carnívoros serían los pobladores habituales de los troncos y las ramas principales de los árboles. Por el contrario, lemuroideos y tarsioideos habrían colonizado las ramas de menor diámetro.

A continuación, siguen dos capítulos dedicados a la evolución cromosómica y genética del orden. De nuevo aquí, la obra se resiente de su carácter ambiguo, a medio camino entre el trabajo de investigación y el manual del principiante. No de otro modo se entiende que la primera parte del capítulo sobre evolución cromosómica esté dedicada a relatar minuciosamente las distintas fases de la mitosis y la meiosis. Por lo que hace al apartado de técnicas inmunológicas, una vez más se pone de manifiesto la congruencia que se observa entre los resultados de éstas y los cladogramas obtenidos con los caracteres anatómicos (por ejemplo, en lo que respecta a la monofilia de estrepsirrinos y de los haplorrinos). Sin embargo, el grado de incertidumbre persiste cuando dichas técnicas son aplicadas a la resolución de problemas más concretos, como es el caso de la tricotomía *Gorilla-Pan-Homo*.

El capítulo final, "A provisional synthesis", es sin duda el más significativo de la obra y el que permite al autor definirse más claramente sobre los distintos frentes abiertos en los anteriores capítulos. En primer lugar, Martin proporciona una definición de primate, que se basa sobre todo en el aparato locomotor (hallux divergente, presencia de uñas y dermatoglifos, etc.) y en caracteres ligados a la visión (presencia de barra postorbital, pared ventral de los bulbos auditivos formada por la petrosa, etc.) y que es congruente con la proporcionada por otros autores en virtud de criterios filogenéticos (por ejemplo, Andrews en 1988). El análisis de algunos de estos caracteres en distintos grupos fósiles permite al autor preguntarse por su inclusión en el orden de los primates. En el caso de Adápidos y Omónyidos, la respuesta positiva es clara. Después de un detenido análisis, acepta que los plesiadapiformes deben ser incluidos en los primates. Tal vez la pregunta adecuada no era si los plesiadapiformes pertenecen a los primates sino, más bien, si se trata de un grupo monofilético.

Pese a todo, la obra parece confirmar el esquema sistemático existente en la actualidad. Así, excluye a los tupaias del orden Primates, confirma la división entre estrepsirrinos y haplorrinos y considera a los simios como un grupo monofilético. Mas su obsesión por la estabilidad de la sistemática anula (más que malogra) el que sería objetivo último de una obra, por lo demás, bien documentada: la reconstrucción filogenética. (J. A.)

LES SAVANTS GENEVOIS DANS L'EUROPE INTELECTUELLE DU XVII AU MILIEU DU XIX SIECLE. Dirigido por Jacques Trembley. Editions du Journal de Genève; Ginebra, 1987. **HISTOIRE DES SCIENCES DE LA TERRE ENTRE 1790 ET 1815 VUE A TRAVERS LES DOCUMENTS INEDITS DE LA SOCIETE DE PHYSIQUE ET D'HISTOIRE NATURELLE DE GENEVE. TROIS GRANDS PROTAGONISTES: MARC-AUGUSTE PICTET, GUILLAUME-ANTOINE DELUC ET JEAN TOLLOT**, por Albert V. Carozzi. *Mémoires de la Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève*, vol. 45, fasc. 2. Ginebra, 1990.

Aunque fenómeno rarísimo en historia de la ciencia, no es difícil de entender el halo de gloria que envolvió, a los ojos de Europa, la ciudad de Ginebra en el último tercio del XVIII y primero del XIX. Cuando ni siquiera habíase establecido su universidad (1867) y las enseñanzas de su Academia municipal no sobrepasaban lo que hoy llamaríamos una segunda enseñanza avanzada. Ciudad más o menos cerrada en su calvinismo militante hasta mediados del XVII, recibe la influencia cartesiana que trae Jean-Robert Chouet, físico y teólogo a un tiempo. Método cartesiano, gusto por la matemática y conocimiento de las ciencias naturales son las tres grandes propuestas de la reforma que dicta, en 1704, el rector de la Academia Jean-Alphonse Turrettini.

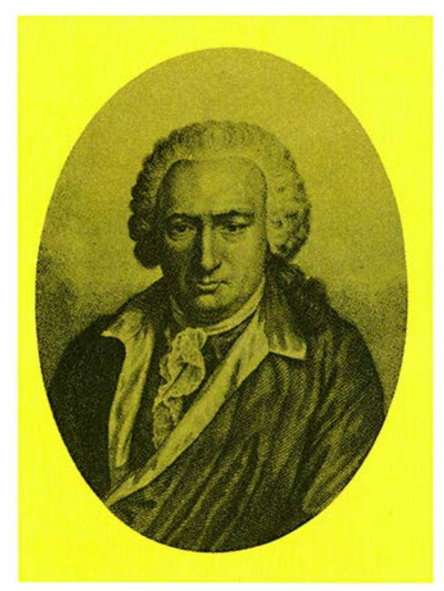
Ese impulso no caerá en saco roto. En Ginebra se venía enseñando teología y derecho, las dos ramas del saber necesarias para administrar la ciudad. Los médicos y los ingenieros se formaban fuera, en París por lo común. Con sus 20.000 habitantes era, en las postrimerías del XVII, la urbe con menor índice de analfabetismo del mundo y de sus planchas (Chouet, De Tournes, Barrillot, Cramer, Bonnant, Paschoud) salían los libros de ciencia para todas partes. No sólo salían. Creó su biblioteca pública, que se sufragaba con un impuesto especial, y alentó el préstamo de libros.

Esa masa culta, que a comienzos del XVIII permite el despunte matemático de Jean-Louis Calandrini y Gabriel Cramer, va a primar la aparición de sociedades, clanes de la ciencia en un comienzo, que se constituyen con miembros de unas cuantas familias patricias, unidas, a su vez, por vínculos de parentesco: Rousseau, Trembley, Bonnet, Saussure. Se explica: poseen medios económi-

cos suficientes para entablar relaciones epistolares con científicos de otros países (Abraham Trembley y Réaumur, y Jean Jalabert y el abate Nollet, por ejemplo), para viajar o para suscribirse a las publicaciones periódicas de Inglaterra, Holanda e Italia. Laboran, en su cartesianismo, contra la metafísica y la palabra hermosa pero vana (de Buffon, Voltaire y enciclopedistas), mientras quedan prendados de las maravillas y teleología de la naturaleza, a la que se dirigen con instrumentos de campo (refinados en Saussure) y útiles de laboratorio (Trembley sobre regeneración de pólipos) o buscando la relación entre función y estructura (Bonnet). A veces el punto de partida es la lectura juvenil de una obra que en España gozó también de amplia difusión: *Espectáculo de la naturaleza, o conversaciones a cerca de las particularidades de la historia natural, que han parecido más a propósito para excitar una curiosidad útil, y formarles la razón a los jóvenes lectores*, de Noël Pluche. (Esta obra tuvo 57 ediciones en francés y se tradujo al castellano con el título transcrito, al inglés, al alemán, al holandés y al italiano.)

Del marco general europeo en ese intervalo que va de Newton a Darwin, de Leibniz a von Helmholtz, o del candil a la lámpara de petróleo y del taller a la fábrica, se ocupa Jacques Roger, quien concede cierta autonomía al desarrollo de la ciencia, a pesar de convulsiones tales como la revolución francesa, la independencia colonial y la secularización del estado. Autonomía que, en el XVIII, lleva aparejada una creciente internacionalización: Berlín, San Petersburgo, Londres, entre otras, ofrecen óptimas oportunidades a los Bernoulli, Euler, Deluc. En el siglo siguiente, Suiza seguirá exportando cerebros; pero la fragmentación de las nacionalidades, la entrada de los distintos idiomas europeos en los distintos medios de expresión científica y el progreso de la ciencia experimental, con la creación de laboratorios y de equipos humanos, acabarán con el nomadismo incluso dentro de un mismo país. Hay más flujo de ideas, no de personas.

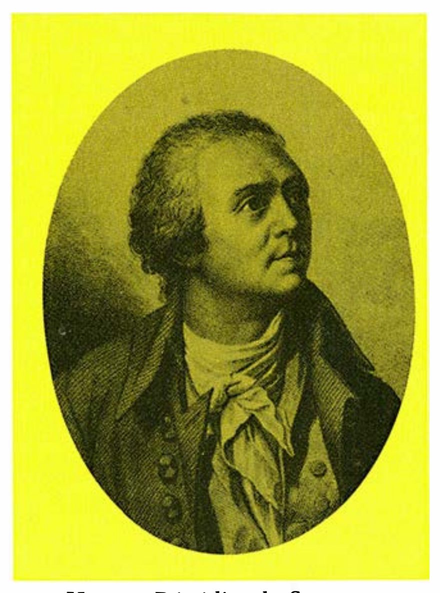
En 1772, Jacques-André Mallet crea, en parte con su propio dinero, el primer observatorio ginebrino. Tres años antes, Mallet había participado con Jean-Louis Pictet en la expedición enviada a Laponia por la Academia de San Petersburgo para observar el paso de Venus por delante del Sol. El conocimiento del firmamento y los registros meteorológicos entran en la vía de la normalización científica con los sucesores:



Charles Bonnet (1720-1793).



Abraham Trembley (1710-1784).



Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799).

Jean Alfred Gautier y, sobre todo, Emile Plantamour, introductor del estudio del campo magnético en su país.

Otras ciudades podrían aventajarle en matemática (Basilea), e incluso en física y en química. Pero la escuela ginebrina no descuidó su cultivo –bastaría recordar la aportación decisiva de Nicolas Théodore de Saussure a la química vegetal, al intercambio gaseoso en particular–, como no podía ser menos en un aspecto de la vida, el del conocimiento, donde no cabe la estanqueidad. Suyo, sin embargo, fue el extraordinario empuje que recibieron, dentro y fuera de los confines de la ciudad, la biología y la geología. En botánica, si en el siglo XVI sólo ofrece un comentario mediocre a Dioscórides del médico de Calvino *Textor*... y el paso herborizador de los maestros Pena, Dalechamps y el mayor de los Bauhin, los siglos XVIII y XIX, e incluso buena parte del XX, viven del *Prodromus* de los De Candolle. La fitología tiene en esa obra su texto. La zoología, por su parte, debe capítulos enteros, y el método, a Trembley, Bonnet y Sénebier. Los tres elaboran el método de experimentación, más allá de la mera observación reinante: "no basta con decir que se ha visto tal cosa; eso y nada es todo uno, si al mismo tiempo no aclaramos cómo lo hemos visto"; aparte, los dos primeros poseen sus propios hitos: Trembley y la regeneración de los hidroideos, Bonnet y la partenogénesis.

Ginebra constituía el marco idóneo para el despegue de la geología desde el *Prodromus*, esta vez, de Steno. Punto de acceso privilegiado a los Alpes, en particular al macizo del Mont-Blanc, ciudad ella misma rodeada por montañanas calcáreas, ricas en fósiles y llenas de atracción para el excursionismo científico incipiente. Unase a ello la coincidencia de figuras como las del subtítulo de la segunda obra de reseña y se explicará la razón última del minucioso análisis que hilvana Carozzi. Este nos resume el cuadro general en *Les savants* y acomete un puntilloso análisis de las actas inéditas de la mencionada sociedad naturalista. Análisis, modélico en el sentido más exigente del término, que le sirve para poner de manifiesto el estado del conocimiento en punto a orogénesis, cristalización, sedimentación, yacimientos termales, sismología, fosilización, geobotánica, vulcanología...

La sombra de Ginebra llega a España. Saussure y Sénebier son prontamente citados en la nueva agronomía. Carlos de Gimbernat pasa en Ginebra el otoño de 1803 y levanta el primer mapa geológico de Suiza. (L. A.)

Apuntes

Se ha creado el primer transistor hecho, por entero, de moléculas orgánicas, que presenta, entre otras propiedades insólitas, la de su flexibilidad: sigue funcionando cuando lo doblamos. Se trata de un análogo oligomérico, de seis unidades, de un polímero semiconductor. La capa de sexitiemileno activo, tal es la molécula, se separa del electrodo de puerta mediante una capa aislante polimérica.

La medición de la desviación gravitatoria de la luz por culpa del Sol constituye la prueba arquetípica de la teoría de la relatividad general. Ese método se ha refinado con el recurso a las observaciones persistentes de radioondas procedentes de cuásares y galaxias activas, observaciones realizadas a través de interferometría de muy larga línea de base. Como resultado, la comprobación de la desviación y el asentamiento de la teoría de la relatividad han ganado en solidez.

En 1267, Roger Bacon escribía en su *Opus maius* sobre "finas secciones de esferas de vidrio que, superpuestas sobre los manuscritos, aumentaban el tamaño de las letras". Antes de que acabara el siglo, los artesanos italianos construían las primeras gafas, unos cristales biconvexos más gruesos en el centro que en los bordes. Parecían lentejas; y con ese nombre se quedaron: "lentes". Sólo servían para mitigar la presbicia de los adultos. Para corregir la miopía de los jóvenes hubo que esperar hasta mediados del siglo XV, con la fabricación de cristales cóncavos. Diríase que el telescopio, que se monta con la combinación de una lente cóncava y otra convexa o de dos convexas, estaba al alcance de la mano. Pero hubo de transcurrir un siglo para dominar el tallado y pulido y obtener la potencia necesaria.

La biología se guía, incluso inconscientemente, por el principio de economía de la naturaleza. Por eso los oceanógrafos no se explicaban que hubiera zonas ricas en nutrientes (nitratos y fosfatos) y, sin embargo, el rendimiento del fitoplancton fuera muy pobre. Se invocaron las explicaciones al uso: falta de luz, bajas temperaturas, explotación intensiva y limitación por metales traza. Lisa y sencilla, la verdad parece ser que les falta hierro. ¿Habrá que pensar en este mineral como nuevo fertilizante? No todos abonan una respuesta afirmativa.

El lago Baikal, viejo que antes fue niño oceánico y se halla en el extenso valle del mismo nombre en Siberia oriental, se ha hecho acreedor de muchos superlativos; entre otros, es el embalse más hondo del mundo (1632 metros) y remansa el mayor volumen de agua dulce (23.000 kilómetros cúbicos). Gracias a su hermosura simpar y su relativo aislamiento, así como a la fauna y flora, únicas, que en él se refugian, se ha convertido en emblema de ecologistas y estetas del mundo entero. Pero los ecólogos han ido más lejos y han reunido un equipo internacional para estudiar los procesos y la celeridad de renovación del agua de profundidad que permite "ventilar" el lago. Con respecto a la productividad biológica del mismo se le considera, tras el estudio de la red trófica, muy próximo al propio de un mar abierto.

Que las normas generales fallan en biología se sabe desde Teofrasto. Pero aún sigue sorprendiéndonos la naturaleza en sus infracciones. Capítulo nuclear de la fitosociología es el de la distribución de las plantas de acuerdo con los suelos; así, las especies de las comunidades que medran cabe los cursos de agua se supone que colman su hidrofilia del río o arroyuelo en cuestión. Se suponía. Midiendo la razón de deuterio usado como traza a hidrógeno se ha comprobado que los árboles de las riberas extraen el agua que necesitan del subsuelo, no del curso fluvial propiamente dicho.

"La historia podría repetirse" es expresión que resuena como aforismo de mal agüero. La historia fue la propagación de la fiebre puerperal por los encargados de atajarla; la repetición sería la distribución incontrolada de zidovudina (AZT), fármaco que muestra cierta eficacia en el tratamiento de los individuos infectados con el virus de la inmunodeficiencia adquirida. Al no disponer de una vacuna que evite su propagación, la prolongación de la vida que facilita la administración del AZT ofrece mayores posibilidades de difusión del virus entre la población no infectada.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



PROGRESOS EN LA TERAPIA DE REHIDRATACION ORAL, por Norbert Hirschhorn y William B. Greenough III
Cada año, este sencillo tratamiento —administrar una solución de electrolitos— salva la vida a un millón de niños que se deshidratarían por la diarrea. Se están desarrollando nuevas versiones del tratamiento para mejorar su eficacia.

«ANYONES», por Frank Wilczek
En la mecánica cuántica, las partículas indistinguibles están sujetas a interacciones especiales. Recientes trabajos han revelado la existencia de una nueva y abundante clase de posibilidades: los «anyones».

RENE JULES DUBOS, por Carol L. Moberg y Zanvil A. Cohn
La búsqueda de las influencias medioambientales en los mecanismos de la enfermedad le llevó a un análisis filosófico de la salud.

LA RETINA DE SILICIO, por Misha A. Mahowald y Carver Mead
Un microprocesador basado en la arquitectura nerviosa del ojo proporciona una forma nueva y más poderosa de realizar cálculos.

LA GENESIS DE LOS YACIMIENTOS MINERALES, por George Brimhall
Antes de que los metales puedan beneficiarse se han de producir una cadena de sucesos geológicos. El agua, el magma y otros fluidos, así como los fenómenos atmosféricos, desempeñan un papel esencial en la formación de las menas.

LA GENETICA DE LOS CABALLOS PURA SANGRE, por Patrick Cunningham
Los pura sangre son los animales domésticos más apreciados; sin embargo, son los que menos han experimentado la influencia de la genética moderna. ¿Hasta qué punto la fertilidad y el rendimiento en las competiciones vienen condicionados por la herencia?

INGENIERIA MECANICA MEDIEVAL EN EL PROXIMO ORIENTE, por Donald R. Hill
Los ingenieros musulmanes conservaron la tecnología precedente y añadieron inventos básicos: la cigüeña, el molino de viento o la bomba de aspiración. Algunas de estas innovaciones anticiparon progresos muy posteriores en Europa.

ASTROSISMOLOGIA, por Juan Antonio Belmonte Avilés, Fernando Pérez Hernández y Teodoro Roca Cortés
Esta nueva ciencia constituye la única herramienta capaz de observar y medir la dinámica y la estructura interna de las estrellas y su evolución.

